Пересчет обмотки асинхронного двигателя при ремонте



В настоящем документе представлена только часть указанного издания, касающаяся построения обмотки и практического пересчета обмоток асинхронных двигателей при ремонте.

Бабенко Демьян Алексеевич, Тепленко Сарра Исааковна, Чибишев Леонид Дмитриевич

"В помощь электрику обмотчику асинхронных электродвигателей" 1965 г.

Rev. 05   20 March 2024

Глава третья
Конструирование обмотки статора асинхронных трехфазных электродвигателей и виды обмоток.
7. Элементы обмоток.

Обмотки электрических машин состоят из проводников соединенных в определенной последовательности и уложенных в пазы пакета стали статора или ротора. Два проводника расположенные в двух пазах и соединенные между собой по торцу статора или ротора, образуют виток.

Группу витков, уложенных соответствующими сторонами в два паза и соединенных между собой последовательно, называют катушкой. Часто вместо названия "катушка" применяют название "секция". Число витков в катушке определяется расчетом и может быть равно одному, нескольким, нескольким десяткам и даже сотням витков.

Для намотки катушек применяется изолированный обмоточный провод круглого или прямоугольного сечения, которое определяется расчетом и зависит от мощности, напряжения, конструкции и назначения электродвигателя. Если при расчете обмотки окажется, что диаметр изолированного провода превышает размер шлица паза, то во избежание выполнения обмотки методом протяжки катушку следует мотать двумя или тремя параллельными проводами с общим сечением равным расчетному. В этом случае все параллельные провода считаются за один эффективный провод, а их общее сечение называется сечением эффективного провода. При наличии параллельных ветвей в обмотке число витков в фазе соответственно увеличивается, т. е. при двух параллельных ветвях число витков в фазе, а значит, и в катушке увеличивается вдвое, при трех параллельных ветвях – втрое и т. д. Соответственно уменьшается сечение провода, однако сечением эффективного провода считается то сечение, которое определено было расчетом, без учета как параллельных проводов, так и параллельных ветвей.

Пример. Расчетное сечение провода обмотки электродвигателя $F = 8{,}4\ мм^2$, диаметр 3,28 *мм*. В наличии имеем обмоточный провод диаметром 1,35 *мм*. и сечением 1,431 $мм^2$, что в 6 раз меньше расчетного сечения. Обмотку можно выполнить в три параллельных провода, но с двумя параллельными ветвями. В этом случае один элементарный провод будет иметь диаметр 1,35 *мм*. и сечение 1,431 $мм^2$, три элементарных провода будут иметь сечение $3 \times 1{,}431 = 4{,}3\ мм^2$, а сечение эффективного провода будет равно: $F = 1{,}431 \times 3 \times 2 = 8{,}6\ мм^2$.

При отсутствии параллельных ветвей в обмотке три параллельных элементарных провода составляют один эффективный провод, а при наличии двух параллельных ветвей три элементарных провода в приведенном примере составят лишь ½ эффективного провода. Это означает, что при наличии параллельных ветвей число одинарных, двойных или тройных проводов должно быть увеличено во столько раз, сколько имеется параллельных ветвей. Указанное в примере соотношение между сечением эффективного провода и сечением элементарного провода, между числом элементарных проводов и числом эффективных проводов следует учитывать при производстве расчета обмоток.

В катушках обмоток различают активную часть и лобовую часть. Активной частью катушки или провода называется та ее часть, которая расположена в пазу пакета статора или ротора, а лобовой частью – те части, которые расположены вне пакета, т. е. на торцах и служат лишь для соединения активных частей проводов витка. Необходимо учитывать, что только в активной части проводов индуцируется *эдс* от основного магнитного потока и создается вращающий момент в электродвигателе, поэтому чрезмерный вылет лобовых частей влечет за собой перерасход меди и других материалов, а также ухудшение электрических свойств электродвигателя.

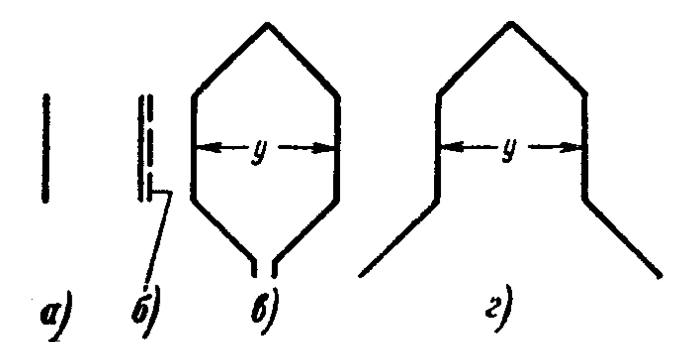


Рис. 30. Условные обозначения элементов обмоток.

Фазой обмотки электродвигателя называется часть обмотки с определенным числом катушек, соединенных последовательно, параллельно или смешанно. В трехфазных обмотках начала, концы, а следовательно и середины фаз сдвинуты одна по отношению к другой на 120 *эл. град*.
Катушечной группой называется несколько катушек фазы стороны которых расположены в рядом лежащих пазах (рис. 31).

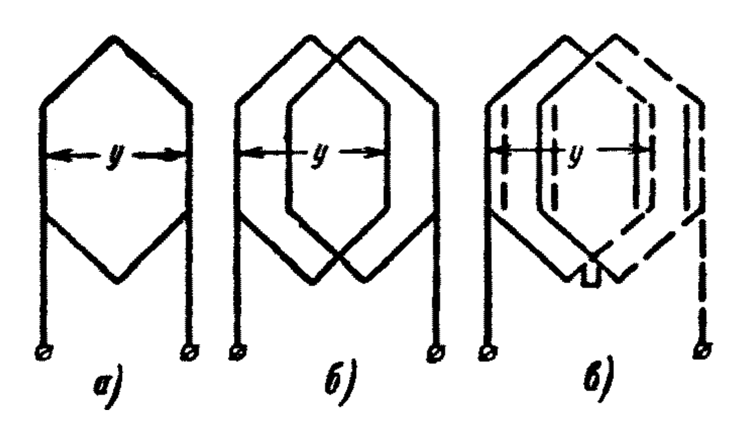


Рис. 31. Условные обозначения элементов обмоток.

Имеются обмотки, у которых стороны катушечных групп расположены не в рядом лежащих пазах, а через паз. Кроме того, катушечная группа может состоять и из одной катушки. Условные обозначения элементов обмоток на схемах показаны на рис. 30 и 31.
Полюсным делением называется расстояние между осями двух соседних полюсов электродвигателя, получающихся в обмотке статора при прохождении по ней трехфазного переменного тока. В двухполюсном электродвигателе полюсное деление равно 180 геометрических градусов, в четырехполюсном – 90°, в шестиполюсном – 60° и т. д. Полюсное деление измеряется, кроме геометрических градусов, и в зубцовых делениях и числом пазов на полюс. Полюсное деление при любом числе пар полюсов равно 180 *электрических градусов*, так как два полюса в трехфазном электродвигателе соответствуют 360 *электрических градусов*.
Полюсным делением называется так же часть дуги внутренней окружности (расточки) статора приходящаяся на один полюс (рис. 32). Обозначается полюсное деление τ.
Шагом обмотки по пазам называется расстояние между активными сторонами катушки. Это расстояние измеряется в электрических градусах и определяется числом зубцов или числом пазов расположенных между сторонами катушки. Результат измерения шага обмотки по пазам в электрических градусах будет правильным, если шириной катушки считать расстояние между осевыми линиями (серединами) активных сторон катушки, если же шириной катушки считать расстояние между ее внутренними сторонами, то только подсчет числа зубцов между сторонами катушки даст правильное число шага по пазам.

Обычно шагом y обмотки по пазам называется число пазов, которое надо прибавить к номеру паза, в котором лежит первая сторона катушки, чтобы получить номер паза занимаемого второй стороной катушки или число зубцов, расположенных между сторонами катушки. В рабочих чертежах и обмоточно–расчетных записках шаг обмотки по пазам часто обозначается двумя цифрами, показывающими в какой паз должна быть уложена вторая сторона катушки, если первая сторона уложена в первый паз. Так запись y = 1 – 7 показывает, что шаг обмотки по пазам равен 6 и что если любой паз, в который вложена первая сторона катушки, назвать первым пазом, то вторая сторона катушки должна быть вложена в 7–й паз (1 + 6). Шаг обмотки может быть диаметральным, укороченным и редко – удлиненным.

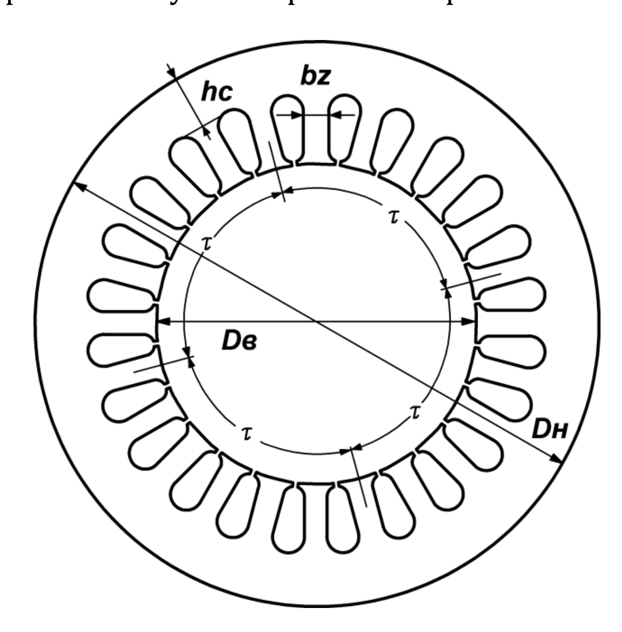


Рис. 32. Пластина пакета статора
с нанесенными основными размерами
и полюсными делениями (при четырех полюсах).

Диаметральным шагом называется такой шаг, при котором расстояние между серединами сторон катушки равно полюсному делению τ. В двухполюсных электродвигателях при шаге обмотки по пазам, равном полюсному делению, стороны катушки будут расположены по линии диаметра расточки статора; при большем числе полюсов стороны катушки будут расположены по линии хорды, однако и в этих случаях название "диаметральный шаг" сохраняется, если он взят равным полюсному делению.
Укороченным шагом обмотки по пазам называется шаг меньший по числу пазов, чем диаметральный.

8. Основные правила конструирования обмоток статора.

При конструировании обмоток статора следует придерживаться следующих основных правил. Все три фазы обмоток должны иметь одинаковое количество витков, одинаковое число катушечных групп и катушек, одинаково соединенных и симметрично расположенных по окружности статора.
Расстояния между началами и концами фаз должны быть сдвинуты на 120 эл. град. или ⅔ полюсного деления. Это требование диктуется условиями симметрии обмотки и вытекает из того, что вращающееся магнитное поле пройдя расстояние, соответствующее двойному полюсному делению $2 \times \tau$, совершает путь равный 360 эл. град. откуда 360 эл. град. = $\alpha = 2 \times \tau$, а 120 эл. град. = $\frac{1}{3} \times 2 \times \tau$, или $\frac{2}{3} \times \tau$. В зависимости от типа обмотки шаг по пазам должен быть диаметральным или с укорочением до 0,8 величины диаметрального. Шаг обмотки по пазам вычисляется исходя из количества пазов статора Z и числа полюсов электродвигателя $2p$. Например, если число пазов статора $Z = 24$, число полюсов $2p = 4$, то диаметральный шаг обмотки по пазам равен:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6 \text{ пазов}$$

откуда стороны катушки должны быть уложены в 1–й и 7–й пазы. При укороченном шаге на один паз шаг обмотки по пазам уже будет равен 5 и стороны катушки должны быть уложены в 1–й и 6–й пазы.

Число катушек в катушечной группе нельзя брать произвольным. Если, например в статоре двухполюсного электродвигателя имеется 12 пазов, то на один полюс приходится шесть пазов и в этих шести пазах должны разместиться стороны катушек всех трех фаз создающих данный полюс. Поэтому при конструировании и составлении схем обмотки число пазов на полюс и фазу является характерной и решающей величиной. В приведенном примере число пазов на полюс и фазу равно 2 [(12 : 2) : 3 = 2] и обозначается индексом q. Таким образом, для подсчета величины q применяется следующая формула:

$$q = \frac{Z}{2p \times m}$$

где Z – число пазов статора или фазного ротора; $2p$ – число полюсов электродвигателя; m – число фаз. Катушечные группы фазы соединяются в следующем порядке. При числе катушечных групп в фазе, равном числу полюсов электродвигателя, они соединяются в такой последовательности: конец первой катушечной группы соединяется с концом второй катушечной группы, начало второй катушечной группы соединяется с началом третьей катушечной группы, конец третьей катушечной группы соединяется с концом четвертой катушечной группы и т. д., т. е. соединяются конец с концом, начало с началом. Такое соединение относится ко всем двухслойным обмоткам и к тем однослойным у которых катушечные группы разделены на катушечные полугруппы, и поэтому числу полугрупп в фазе этих обмоток равно числу полюсов (однослойные обмотки "в развалку").

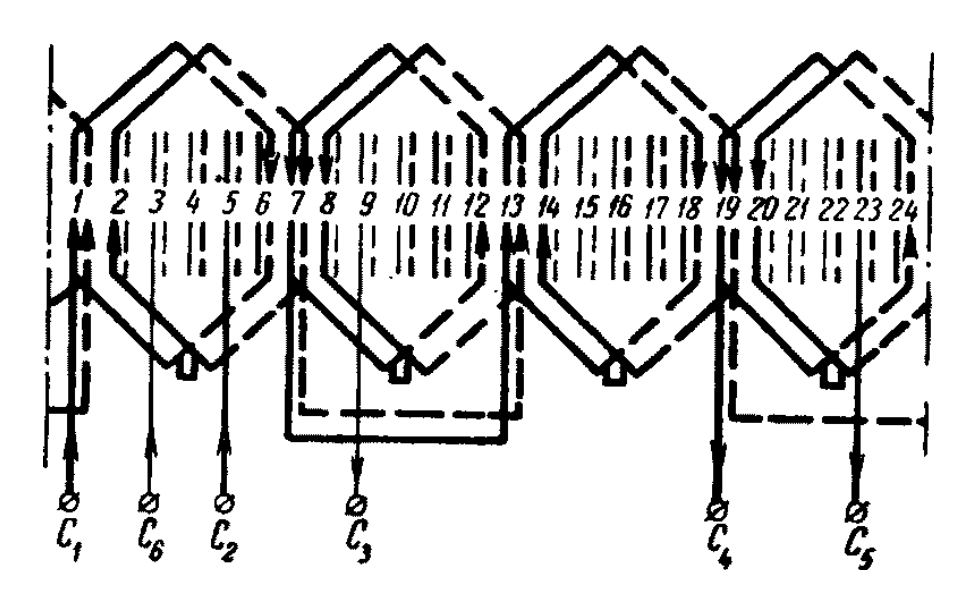


Рис. 33. Соединение катушечных групп в двухслойной обмотке.

Если число катушечных групп в фазе меньше числа полюсов электродвигателя, соединения их выполняются следующим образом: конец первой катушечной группы соединяют с началом второй катушечной группы, конец второй катушечной группы соединяют с началом третьей катушечной группы и т. д., т. е. соединяются конец с началом. Началом катушечных групп принято считать левые концы выводов катушечных групп по ходу намотки статора против часовой стрелки. На рис. 33 и 34 показан первый вид соединений катушечных групп, а на рис. 35 второй вид соединений. Активные и индуктивные сопротивления фаз и параллельных ветвей должны быть одинаковыми, поэтому во всех трех фазах и в параллельных ветвях должно быть одинаковое число равных по размеру катушек, одинаковое число эффективных витков и одинаковое сечение эффективного провода.

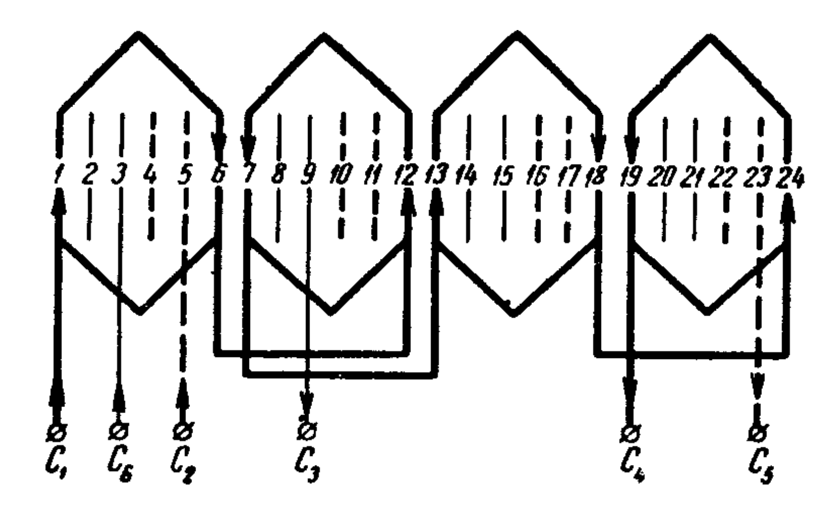


Рис. 34. Соединение катушечных групп в однослойной секционной обмотке "в развалку".

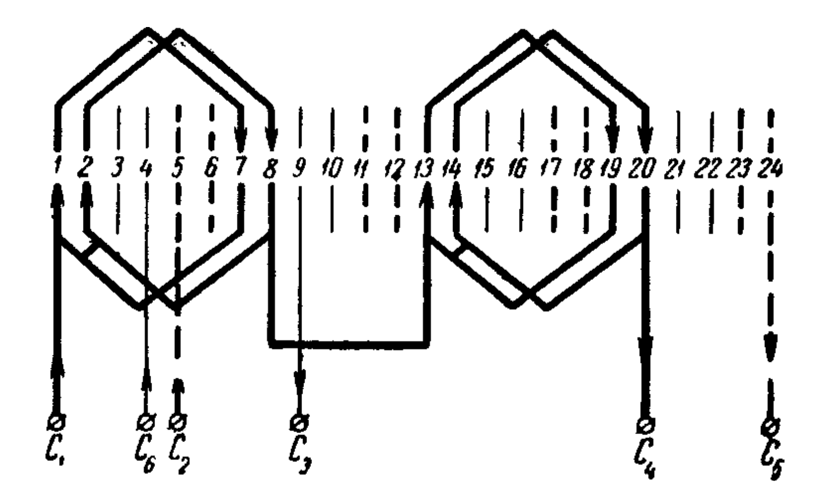


Рис. 35. Соединение катушечных групп в однослойной секционной обмотке.

При расчетах обмоток электрических машин вычисляется необходимое число эффективных витков в фазе, а потом число эффективных витков или эффективных проводов в пазу. Если обмотка выполнена в несколько параллельных проводов, например в три, то все три элементарных витка будут составлять один эффективный виток. При выполнении обмотки с несколькими параллельными ветвями число одинарных, двойных или тройных витков в фазе должно быть соответственно увеличено, но число эффективных витков в фазе, как и число эффективных проводов в пазу, от этого не должно меняться. В целях бóльшей равномерности магнитного потока в воздушном зазоре параллельные ветви в обмотках статора асинхронных электродвигателей составляются из расположенных подряд катушечных групп.

Параллельные ветви следует выполнять так, чтобы направление токов в проводах катушечных групп было таким же, каким оно было в обмотке без параллельных ветвей.

На рис. 36 показаны соединения в параллельные ветви катушечных групп фазы электродвигателя с $2p = 4$ при различных видах обмотки статора.

При замене типа обмотки, связанной с изменением шага по пазам, например при переходе с однослойной обмотки на двухслойную с укороченным шагом или наоборот, следует изменять и число эффективных витков в фазе.

При уменьшении шага следует увеличивать число эффективных витков, а значит и число эффективных проводов в пазу, а при увеличении шага – уменьшать их; это объясняется тем, что при укороченном шаге *эдс* катушки меньше *эдс* катушки с диаметральным шагом, что компенсируется увеличением числа витков в катушке.

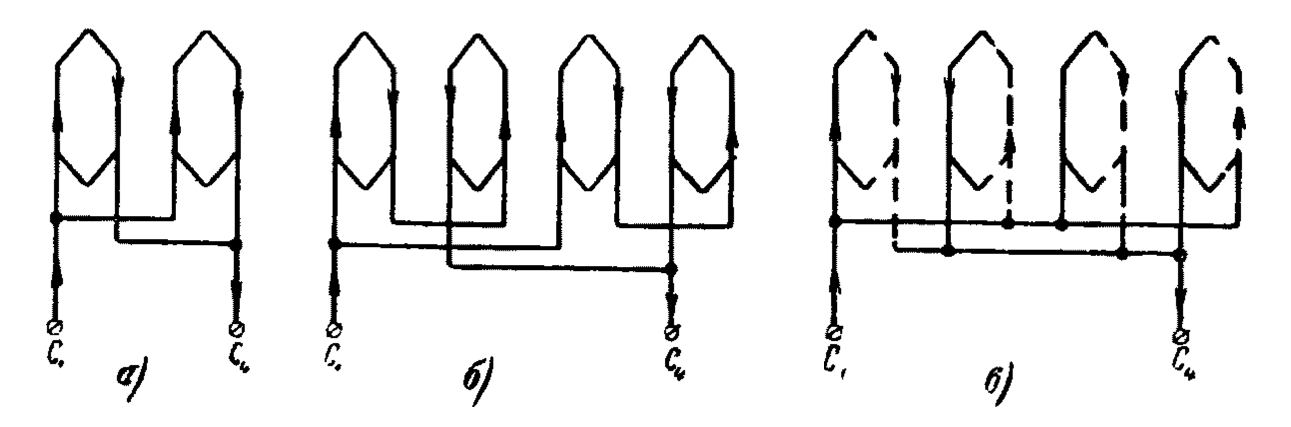


Рис. 36. Соединение катушечных групп в фазе
в параллельной ветви четырехполюсного электродвигателя.

Отношение *эдс* катушки при укороченном шаге к *эдс* катушки с тем же числом витков при диаметральном называют обмоточным коэффициентом.
Так как на величину *эдс* фазы влияет также число катушек в катушечной группе (*эдс* катушечной группы меньше *эдс* одной катушки с тем же числом витков), при уточнении числа витков в фазе обмотки в связи с изменением шага по пазам одновременно следует учитывать и это положение, вводя дополнительно так называемый коэффициент распределения обмотки. При q = 1 коэффициент распределения равен единице, при q = 2 коэффициент распределения обмотки равен 0,966 и т. п. Для удобства такого вычисления оба эти коэффициента сводят в один, который называется "*обмоточный коэффициент обмотки*". В таблице 2 даны значения обмоточного коэффициента *kw* в зависимости от числа катушек в катушечной группе и укорочения шага обмотки. Величину укорочения шага обмотки вычисляют по формуле:

$$\beta y = \frac{y\text{укороч}}{y\text{диаметр}}$$

Таблица 2. Значение обмоточных коэффициентов *kw* трехфазной обмотки.

число катушек в катушечной группе	укорочение шага обмотки в долях единицы								
	1,00	0,95	0,90	0.85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924	0,891	0,853	0,809
2	0,966	0,963	0,954	0,939	0,919	0,893	0,861	0,824	0,781
3	0,960	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887	0,855	0,819	0,777
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885	0,854	0,817	0,775
5 – 7	0,957	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884	0,853	0,816	0,774
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883	0,852	0,815	0,773

При промежуточных значениях укорочения шага обмотки βy величину обмоточного коэффициента *kw* определяют следующим образом. Если обмотка с укорочением шага βy = 0,83 и числом катушек в катушечной группе q = 3, то по табл. 2 находят значение обмоточного коэффициента для расположенных подряд значений укорочения шага обмотки при q = 3:

при βy_1 = 0,85 kw_1 = 0,933;
при βy_2 = 0,80 kw_2= 0,913.

Вычисляют на какую величину уменьшается обмоточный коэффициент при уменьшении укорочения шага обмотки на одну сотую долю единицы:

$$\frac{kw_1 - kw_2}{85 - 80} = \frac{0{,}933 - 0{,}913}{5} = \frac{0{,}02}{5} = 0{,}004$$

Вычисляют на какую величину уменьшается обмоточный коэффициент при βy = 0,83 по сравнению с обмоточным коэффициентом при βy_1 = 0,85:

$$0{,}004 \times (85 - 83) = 0{,}004 \times 2 = 0{,}008$$

Вычисляют обмоточный коэффициент для заданной обмотки:

$$kw = kw_1 - 0{,}008 = 0{,}933 - 0{,}008 = 0{,}925$$

9. Виды обмоток.

Существует много признаков, по которым определяется классификация обмоток и поэтому одним и тем же обмоткам часто даются различные наименования. Наиболее распространенные типы обмоток следующие.

По способу заполнения пазов все обмотки делятся на *однослойные* и *двухслойные*. В однослойных обмотках сторона катушки заполняет весь паз, в двухслойных – сторона катушки заполняет половину паза, другую половину заполняет сторона другой катушки. Число катушек в однослойной обмотке равно половине числа пазов, так как одна катушка занимает два паза, а в двухслойной число катушек равно числу пазов, так как каждая катушка одной стороной занимает половину паза, а другой стороной – половину другого паза. По числу фаз обмотки делятся на однофазные и многофазные. Из многофазных обмоток практический интерес представляют трехфазные. По виду витков и катушек обмотки делятся на волновые и петлевые. Волновые обмотки роторов называют также стержневыми, так как элементом обмотки является полувиток, состоящий из стержня. Все остальные обмотки статоров и роторов асинхронных электродвигателей являются петлевыми. Если катушки имеют разные шаги, причем одна катушка охватывает другую, то такие обмотки можно называть обмотками с концентрическими катушечными группами. Однако многие называют их "катушечными", "катушечно–концентрическими" или "концентрическими".

На рис. 37 изображена однослойная катушечная (концентрическая) обмотка двухполюсного электродвигателя, статор которого имеет 18 пазов. Число катушек в катушечной группе q = 3 и число катушечных групп в обмотке тоже равно 3, так как в однослойных обмотках число катушечных групп равно числу фаз помноженному на число пар полюсов; отсюда число катушечных групп равно будет $p \times m = p \times 3$, где p – число пар полюсов, $2p$ – число полюсов. Шаги обмотки по пазам в катушках катушечной группы этой обмотки, как и во всех катушечных (концентрических) обмотках, разные:

$$y_1 = 7;\ y_2 = 9;\ y_3 = 11$$

а диаметральный или средний шаг y при Z = 18 и $2p$ = 2 равен $Z : 2p = 18 : 2 = 9$. Правильность принятых шагов по пазам катушек этого вида обмоток проверяется следующим методом. Шаги всех катушек катушечной группы складываются, и полученное число делится на число катушек в катушечной группе, результат должен быть равен величине диаметрального шага:

$$y\text{ср} = (y_1 + y_2 + y_3) : 3 = (7 + 9 + 11) : 3 = 27 : 3 = 9$$

В данной обмотке имеется одна катушка с несимметричными лобовыми частями, которые бывают в катушечных (концентрических) обмотках с нечетным числом пар полюсов.

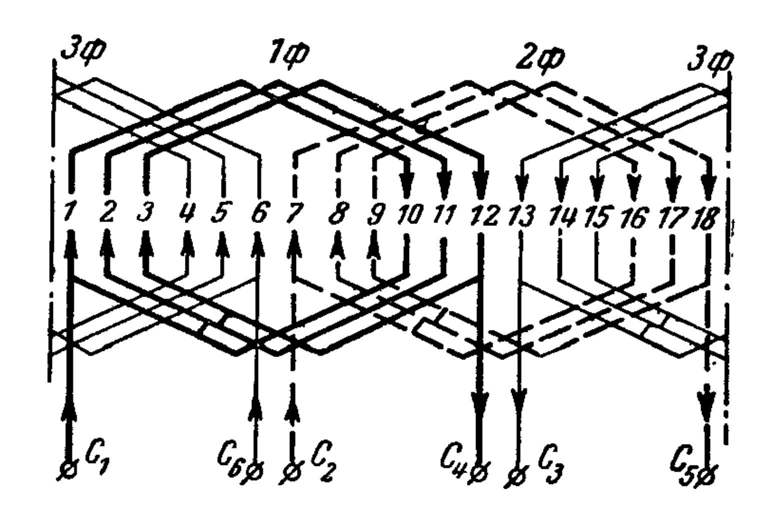


Рис. 38. Схема однослойной секционной обмотки Z = 18; $2p$ = 2; q =3; y = 9.

Если катушки катушечной группы имеют одинаковый шаг и одинаковые размеры, то такие обмотки иногда называются однослойными шаблонными обмотками. На рис. 38 изображена схема однослойной секционной обмотки двухполюсного электродвигателя. Статор имеет 18 пазов. Число катушек в катушечной группе 3 число катушечных групп в фазе 1, шаг по пазам y = 9 (1 – 10), то есть обмотка выполнена с диаметральным шагом. Разновидностью однослойных катушечных (концентрических) обмоток и однослойных секционных обмоток являются однослойные катушечные (концентрические) обмотки "в развалку" и однослойные секционные обмотки "в развалку", фазы обмотки которых состоят из катушечных полугрупп, соединенных так чтобы в образовании каждого полюса участвовало q сторон катушек каждой фазы. На рис. 39 дана схема однослойной секционной обмотки "в развалку" двухполюсного электродвигателя.

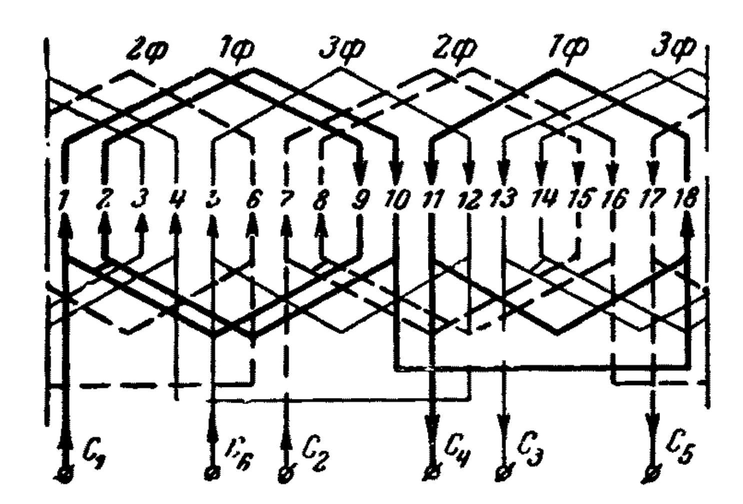


Рис. 39. Схема однослойной секционной обмотки "в развалку"
Z = 18; $2p$ = 2; q = 3; y_1 = 7; y_2 = 8.

Статор имеет 18 пазов, число пазов на полюс и фазу q = 3, число катушек в фазе 3, число катушек в обмотке 9. Каждая катушечная группа, состоящая из трех катушек, разделена на две катушечные полугруппы; одна имеет две катушки, другая – одну катушку. Соединены катушечные полугруппы так, чтобы в образовании полюса участвовало q сторон катушек каждой фазы. Данная обмотка имеет укороченный и разный шаг по пазам: y_1 = 7, y_2 = 8, диаметральный шаг такой обмотки был бы y = 9. В связи с укорочением шага по пазам расход меди на лобовые части обмотки меньше, чем в однослойной, секционной, показанной на рис. 38, для такого же электродвигателя. Разные шаги по пазам, как и укорочение шага, в данной обмотке и других аналогичных ей не меняют свойств обмотки.

Здесь следует остановиться на понятии "фазная зона". Участок статора, измеренный в электрических градусах, на котором расположены стороны катушек катушечной группы одной фазы и одного полюса, называют фазной зоной.
Для двухслойной обмотки шириной фазной зоны будет участок статора, также измеренный в электрических градусах, на котором расположены только верхние (или только нижние) стороны катушек катушечной группы одной фазы и одного полюса. Трехфазные обмотки принято конструировать так, чтобы ширина фазной зоны составляла 60 эл. град. Для уяснения вычислим, например, ширину (разной зоны однослойной обмотки, приведенной на рис. 38. Так как два (полюса любой обмотки соответствуют 360 эл. град. и в однослойной обмотке на пару полюсов приходятся три катушечные группы (по одной на каждую фазу) то стороны трех катушечных групп данной обмотки лежащих под одним полюсом, занимают 180 : 3 = 60 эл. град.
Если число пазов на полюс и фазу выразим в электрических градусах, то получим ширину фазной зоны:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{360 \times p}{2p \times m} = \frac{360}{2 \times 3} = \frac{360}{6} = 60 \text{ эл. град.}$$

Однослойные обмотки, у которых фазные зоны заняты только сторонами катушек своей фазы, называются обмотками со сплошной фазной зоной; у них q сторон катушек каждой катушечной группы расположены в рядом лежащих пазах и ширина фазной зоны не выходит за пределы 60 эл. град. В противном случае обмотки называются обмотками с несплошной фазной зоной.

Глава четвертая
Выбор вида обмотки. Составление схем обмотки статора асинхронных трехфазных электродвигателей. Применение схем при намотке.
10. Выбор вида обмотки.

При ремонте электродвигателей следует стремиться улучшению их электрических свойств и технических данных по сравнению с данными завода–изготовителя. В большинстве случаев возможность для этого имеется особенно при ремонте электродвигателей старых типов.
Применение новых обмоточных проводов с более теплостойкой и более тонкой изоляцией и новых видов электроизоляционных материалов дает возможность повысить номинальную мощность машины даже в электродвигателях единой серии А и АО или же при сохранении прежней мощности повысить их надежность в работе. При выборе вида обмотки рекомендуется руководствоваться следующими соображениями.
Двухслойные обмотки с укороченным шагом имеют ряд преимуществ по сравнению с однослойными обмотками. В двухслойных обмотках расход обмоточных проводов на 10–15% меньше, чем в однослойных, за счет меньшей длины лобовых частей, а при укорочении равном 0,8 полюсного деления, форма кривой поля и *эдс* приближается к синусоиде, что улучшает электрические свойства электродвигателя, а также *кпд* и $cos\varphi$ в связи с меньшим активным и индуктивным сопротивлением обмотки. Двухслойные обмотки легко выполнимы при дробном q. Значительное распространение имеют и однослойные обмотки, особенно в электродвигателях малых мощностей; объясняется это тем, что в однослойных обмотках коэффициент заполнения паза медью выше, чем в двухслойных, так как в двухслойных обмотках между нижними и верхними сторонами катушек прокладываются прокладки из электрокартона. Кроме того, при переходе на обмотку с укороченным шагом необходимо увеличивать число эффективных проводов в пазу чтобы не допустить увеличения тока холостого хода, а все вместе может даже снизить мощность электродвигателя малых габаритов при замене однослойной обмотки двухслойной. Затраты труда при выполнении однослойной обмотки также ниже, чем при двухслойной обмотке.

При выборе вида обмотки определенную роль играет наличие требуемого сечения обмоточного провода. При больших диаметрах провода легче выполнить обмотку двухслойной, так как толщина катушки при этом вдвое меньше, чем в однослойной, что облегчает процесс гибки лобовых частей. При малых диаметрах проводов и необходимости выполнять обмотку в два или три параллельных провода выгоднее применить однослойную обмотку, позволяющую иметь более высокий коэффициент заполнения паза медью.

Вопрос выбора типа обмотки иногда решается исходя из конструктивных особенностей данного электродвигателя. При малой высоте спинки статора и небольшом пространстве между подшипниковым щитом и торцом сердечника статора обмотку следует выполнять двухслойной, у которой лобовые части равномерно распределяются по окружности статора, поэтому они и имеют меньший вылет.

Что касается выбора однослойной обмотки, то с точки зрения электрических свойств электродвигателя катушечная (концентрическая) обмотка и однослойная секционная с диаметральным шагом равнозначны и изготовление их производится, за редким исключением, с применением шаблонов. Однако выполнение однослойной секционной обмотки проще и легче, поэтому в ремонтной практике катушечные (концентрические) обмотки реже встречаются. Катушечная (концентрическая) обмотка в основном применяется при намотке роторов электродвигателей небольших мощностей, а также при намотке статоров и роторов имеющих полузакрытые пазы с небольшой величиной пазового шлица через который провод не проходит. В таких случаях процесс намотки производится в протяжку.

Большинство однослойных секционных обмоток "в развалку", даже при укороченном шаге, обладает такими же электрическими и магнитными свойствами как и однослойные секционные обмотки выполненные без укорочения шага. Это касается тех однослойных обмоток, которые несмотря на укорочение шага имеют сплошную фазную зону занимающую, как и в обмотках с диаметральным шагом 60 эл. град. Преимущество таких обмоток заключается в экономии меди и более равномерном распределении лобовых частей катушек по окружности статора. То же самое можно сказать и в отношении катушечных (концентрических) обмоток "в развалку".

На рис. 40 в качестве примера приведена схема однослойной секционной обмотки "в развалку" с не сплошной фазной зоной. В этой обмотке q сторон катушек катушечной группы каждой фазы расположены не в рядом лежащих пазах, и поэтому здесь фазная зона равна 80 эл. град., вместо 60 эл. град. у обмоток со сплошной фазной зоной.

Обмотки с не сплошной фазной зоной и нечетным q дают несинусоидальное вращающееся поле, и поэтому их по возможности следует избегать.

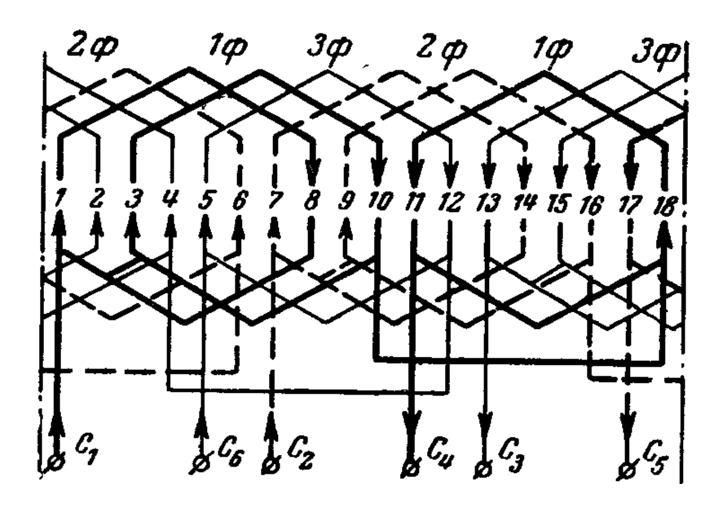


Рис. 40. Схема однослойной секционной обмотки "в развалку".
$Z = 18$; $2p = 2$; $q = 3$; $y = 7$.

При переходе на обмотку с укороченным шагом или наоборот следует корректировать число эффективных витков в фазе или число эффективных проводов в пазу соответственно с изменившимся обмоточным коэффициентом.
Пример. У однослойной секционной обмотки статора электродвигателя с числом пазов Z = 36, числом полюсов $2p$ = 4, q = 3, y = 9, с числом эффективных проводов в пазу равным 22, требуется определить число эффективных проводов в пазу при переходе на двухслойную обмотку с шагом y = 7. По табл. 2 определяется обмоточный коэффициент однослойной обмотки с диаметральным шагом $\beta'y$ = 1 и q = 3: $k'w$ = 0,96
Определяется величина укорочения шага двухслойной обмотки:

$$\beta_y'' = \frac{7}{9} = 0{,}78$$

Пользуясь табл. 2 определяют обмоточный коэффициент двухслойной обмотки имеющей укорочение шага βy = 0,78 при q = 3:

$$k''w = kw_1 - \left[\left(\frac{kw_1 - kw_2}{80 - 75}\right) \times 2\right] = 0{,}913 - \left[\left(\frac{0{,}913 - 0{,}887}{5}\right) \times 2\right] = 0{,}913 - 0{,}010 = 0{,}903$$

Производится перерасчет числа эффективных проводов в пазу:

$$N_{\Pi}'' = N_{\Pi}' \times \frac{k'w}{k''w} = 22 \times \frac{0{,}96}{0{,}903} \approx 24$$

11. Составление схем обмотки статора асинхронных трехфазных электродвигателей.

Наиболее распространенным способом изображения схем обмоток является развертка окружности статора или ротора на плоскость с изображением пазов вертикальными линиями с их нумерацией порядковыми числами. В однослойных обмотках паз обозначается одной сплошной линией, что означает и вложенную в паз сторону катушки. В двухслойных обмотках паз обозначается двумя рядом расположенными линиями. Левая линия обычно делается сплошной и обозначает одну сторону катушки верхней половины паза, а правая – пунктирной и обозначает сторону катушки, расположенную в нижней половине паза. Исходными данными для составления схемы обмотки статора являются: число пазов статора Z, число полюсов электродвигателя $2p$, число фаз m, число параллельных ветвей a, число катушек в обмотке nк, число катушечных групп в обмотке nкг, число пазов между сторонами катушки nп. Порядок составления схем для различных видов обмоток статора дается ниже.

а) Однослойные секционные трехфазные обмотки с целым числом пазов q на полюс и фазу.

Пример. Составить схему обмотки статора двухполюсного электродвигателя, у которого

Z = 12; $2p$ = 2; a = 1 (рис. 41).

Определяется число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{12}{2 \times 3} = 2$$

Следовательно, катушечная группа состоит из двух катушек.

Определяется шаг обмотки по пазам:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{12}{2} = 6$$

Обмотку выполняют с диаметральным шагом, где левую сторону первой катушки располагают в 1–м пазу, правую – в 7–м пазу; левую сторону второй катушки располагают во 2–м пазу, правую – в 8–м пазу, обе катушки катушечной группы соединяют коротенькой линией, показывающей последовательность соединения катушек. Подсчитывают число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n\text{к} = \frac{Z}{2} = \frac{12}{2} = 6, \ \ n\text{кг} = \frac{n\text{к}}{q} = \frac{6}{2} = 3$$

откуда следует, что на одну фазу приходится по одной катушечной группе.
Определяют расстояние между началами фаз т. е. ⅔ × τ:

$$\frac{2}{3} \times \tau = \frac{2}{3} \times \frac{Z}{2p} = \frac{2 \times Z}{3 \times 2p} = \frac{2 \times 12}{3 \times 2} = 4$$

Это означает, что если начало первой фазы расположить в 1–м пазу обмотки, то начало второй фазы должно находиться в 5–м пазу и начало третьей фазы в 9–м пазу. Катушечную группу второй фазы укладывают в пазы: левые стороны катушек – в 5–й и 6–й пазы, а правые стороны – в 11–й и 12–й Катушечную группу третьей фазы укладывают соответственно в 9–й и 10–й 3–й и 4–й пазы. Здесь 3–й и 4–й пазы получились по методу круговой схемы; к номеру паза 9 прибавили шаг 6 и вычли Z = 12, откуда (9 + 6) – 12 = 3, а к пазу 10 прибавили шаг 6, вычли 12 и получили 4–й паз.

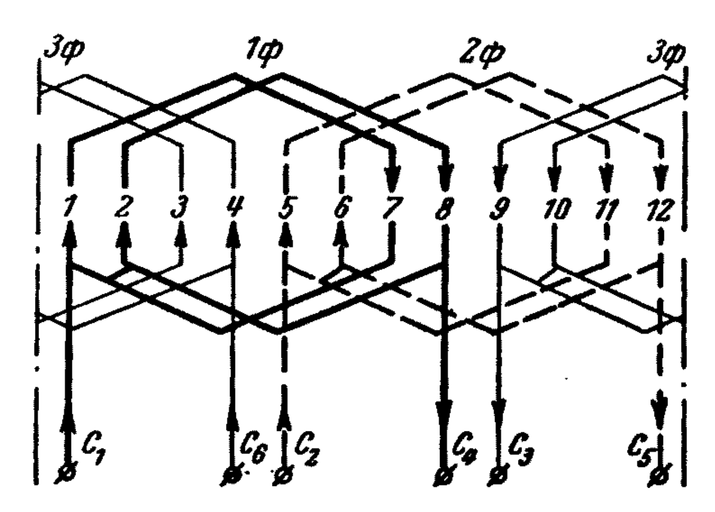


Рис. 41. Схема однослойной секционной обмотки Z =12; 2p = 2; q = 2; y = 6.

Концы фаз обозначают по ГОСТ: начало 1–й фазы – С1 конец первой фазы – С4, начало 2–й фазы – С2, конец второй фазы – С5, начало 3–й фазы – С3, конец 3–й фазы – С6 и проверяют расстояние между концами фаз, которое тоже должно равняться ⅔ × τ. Если ток входит в обмотку из начала 1–й и 2–й фазы (на схеме стрелки направлены вверх), а выходит из обмотки через начало 3–й фазы (на схеме стрелки направлены, вниз), то после нанесения стрелок, показывающих направление тока в проходах, вся обмотка разделится на две части, имеющие противоположную полярность и обозначающие два полюса.

Пример. Составить схему трехфазной обмотки статора электродвигателя, у которого Z = 12; $2p$ = 4, a = 1 (рис. 42). Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{12}{4 \times 3} = 1$$

т. е. катушечная группа состоит из одной катушки. Определяют шаг обмотки по пазам:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{12}{4} = 3$$

Подсчитывают число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n\text{к} = \frac{Z}{2} = \frac{12}{2} = 6, \;\; n\text{кг} = \frac{n\text{к}}{q} = \frac{6}{1} = 6$$

Следовательно на каждую фазу приходятся две катушечные группы, по одной катушке в каждой. Размещают в пазах первую катушечную группу первой фазы: в 1–м пазу – левую сторону катушки, а в 4–м пазу – правую сторону катушки.

В однослойных секционных обмотках катушечные группы одной фазы отстоят друг от друга на два диаметральных шага, поэтому вторая катушечная группа будет занимать 7–й и 10–й пазы. Определяют расстояние между началами фаз: так как

$$\frac{2}{3} \times \tau = \frac{2 \times Z}{3 \times 2p} = \frac{Z}{3 \times p}$$

а

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{Z}{2p \times 3} = \frac{Z}{p \times 6}$$

то

$$\frac{2}{3} \times \tau = 2 \times q \quad \text{здесь: } 2 \times q = 2 \times 1 = 2$$

Исходя из этого, начало 2–й фазы расположится в 3–м пазу, а начало 3–й фазы – в 5–м пазу. Катушечные группы 2–й и 3–й фазы расположатся следующим образом; первая катушечная группа 2–й фазы будет занимать 3–й и 6 й пазы, а вторая должна быть расположена от нее на два диаметральных шага, или занимать 9–й и 12–й пазы.

Первая катушечная группа 3–й фазы разместится в 5–м и 8–м пазах, а вторая разместится в 11–м и 2–м пазах. Соединяют катушечные группы, где конец первой катушечной группы соединяется с началом второй в каждой фазе.

Выводы, показывающие начала и концы фаз, нумеруются по ГОСТ и по ним проверяют расстояние между концами фаз, которое должно равняться 2 × q, а стрелками обозначают направление тока в проводах, проверив при этом, разделена ли обмотка на четыре части, представляющие собой четыре полюса. После проверки каждая катушечная группа отмечается соответствующим номером фазы.

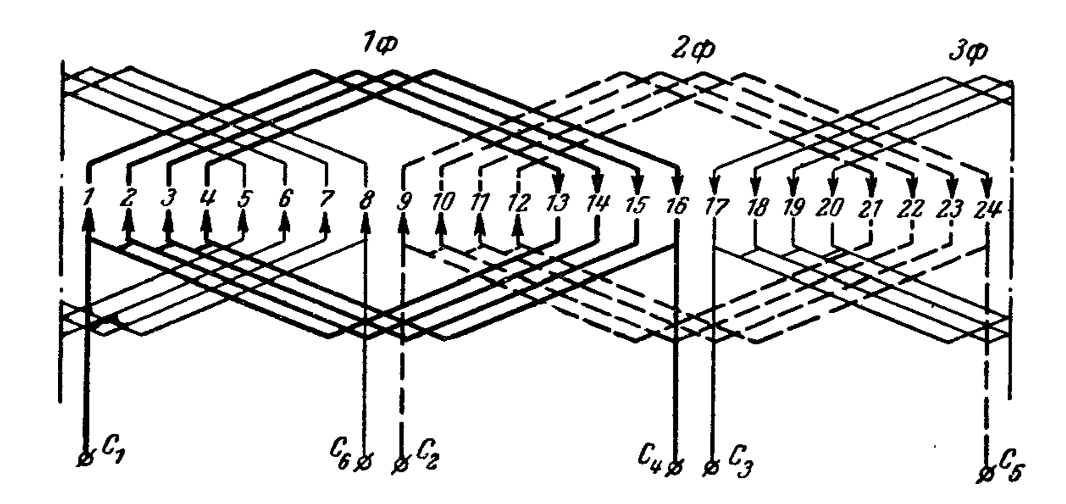


Рис. 43. Схема однослойной секционной обмотки, $Z = 24$; $2p = 2$; $q = 4$; $y = 12$.

На рис. 43 показана схема обмотки статора со следующими данными: $Z = 24$; $2p = 2$; $q = 4$; $y = 12$. Порядок составления схемы такой же, как в примере 1. Расстояние между началами фаз равно $2 \times q = 2 \times 4 = 8$, также и между концами фаз. Шаг обмотки по пазам диаметральный. В образовании полюса участвуют стороны катушечных групп всех трех фаз.

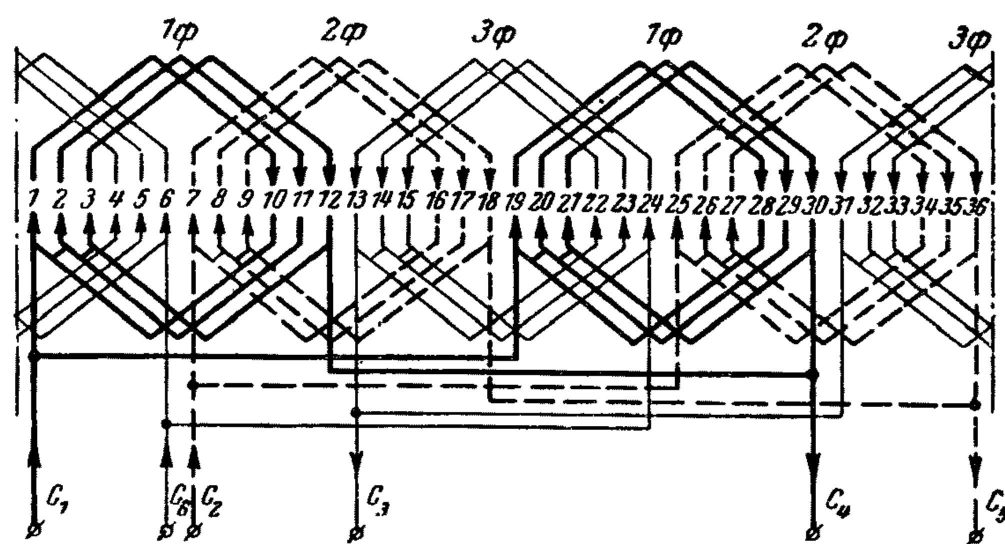


Рис. 44. Схема однослойной секционной обмотки, $Z = 36$; $2p = 4$; $q = 3$; $y = 9$; $a = 2$.

Пример. Составить схему трехфазной обмотки статора. Дано: $Z = 36$; $2p = 4$; $a = 2$ (рис. 44). Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

Определяют шаг обмотки по пазам:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n\text{к} = \frac{Z}{2} = \frac{36}{2} = 18, \quad n\text{кг} = \frac{n\text{к}}{q} = \frac{18}{3} = 6$$

Таким образом, на фазу приходятся 6 : 3 = 2 катушечные группы, где каждая катушечная группа состоит из трех катушек.

Размещают в пазах 1–ю катушечную группу 1–й фазы, левая сторона займет 1–й, 2–й и 3–й пазы, а правая сторона 10–й, 11–м и 12–й пазы.
Начало 2–й катушечной группы 1–й фазы расположится на два диаметральных шага от начала первой катушечной группы, т. е. в 19–м пазу; конец расположится в 28–м пазу; остальные две катушки левыми сторонами займут 20–й и 21–й пазы, а правыми – 29–й и 30–й пазы.
Начало 2–й фазы расположится от начала 1–й фазы на 2 × q =2 × 3 = 6, т. е. в 7–м пазу, начало 3–й фазы – в 13–м пазу. Левые стороны 1–й катушечной группы 2–й фазы займут 7–й, 8–й и 9–й пазы, правые – 16–й, 17–й и 18–й пазы. Левые стороны 1–й катушечной группы 3–й фазы расположатся в 13–м, 14–м и 15–м пазах, правые – в 22–м, 23–м и 24–м пазах.
Вторая катушечная группа 2–й фазы расположится на два диаметральных шага от 1–й катушечной группы своей фазы; левая ее сторона займет 25–й, 26–й и 27–й пазы, а правая – 34–й, 35–й и 36–й пазы. Вторая катушечная группа 3–й фазы левой стороной займет 31–й, 32–й и 33–й пазы, а правой стороной – 4–й, 5–й и 6–й пазы.
Соединяют катушки в каждой катушечной группе и фиксируют номера фаз в катушечных группах.
Соединяют катушечные группы каждой фазы в две параллельные ветви, где на одну параллельную ветвь приходится по одной катушечной группе. Начала 1–й и 2–й катушечных групп соединяют вместе, а общий вывод будет началом фазы. Концы 1–й и 2–й катушечных групп также соединяют вместе и общий вывод будет концом фазы.
Аналогично производят соединение катушечных групп в две параллельные ветви во 2–й и 3–й фазах и буквенными индексами обозначают начала и концы фаз.
Стрелками обозначают направление токов в проводах и параллельных ветвях, проверив правильность расположения полюсов в обмотке. Каждый полюс должен быть образован сторонами катушечных групп всех трех фаз, а чередование полюсов должно быть С–Ю–С–Ю или Ю–С–Ю–С в зависимости от того, какое направление стрелок было принято за северный и южный полюсы.

б) Однослойные катушечные (концентрические) обмотки с целым q.

Пример. Дано: Z = 36; 2p = 4; a = 1. Требуется составить схему трехфазной обмотки (рис. 45). Определяют число пазов, приходящееся на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

Определяют средний шаг обмотки по пазам:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n\text{к} = \frac{Z}{2} = \frac{36}{2} = 18, \;\; n\text{кг} = \frac{n\text{к}}{q} = \frac{18}{3} = 6$$

Таким образом в каждой фазе будет по две катушечные группы, а в каждой катушечной группе по три катушки разной ширины (обмотка концентрическая).

Берется катушечная группа, где левую сторону самой узкой катушки помещают в 3–й паз, а правую – в паз, расположенный от 3–го паза на расстоянии 2 × q, т. е. в 10–й паз;

тогда следующая за ней в порядке намотки вторая катушка должна быть помещена во 2–й и 11–й пазы, а третья катушка – в 1–й и 12– й пазы; при этом средний шаг получится равным:

$$
y\text{ср} = \frac{7 + 9 + 11}{3} = 9
$$

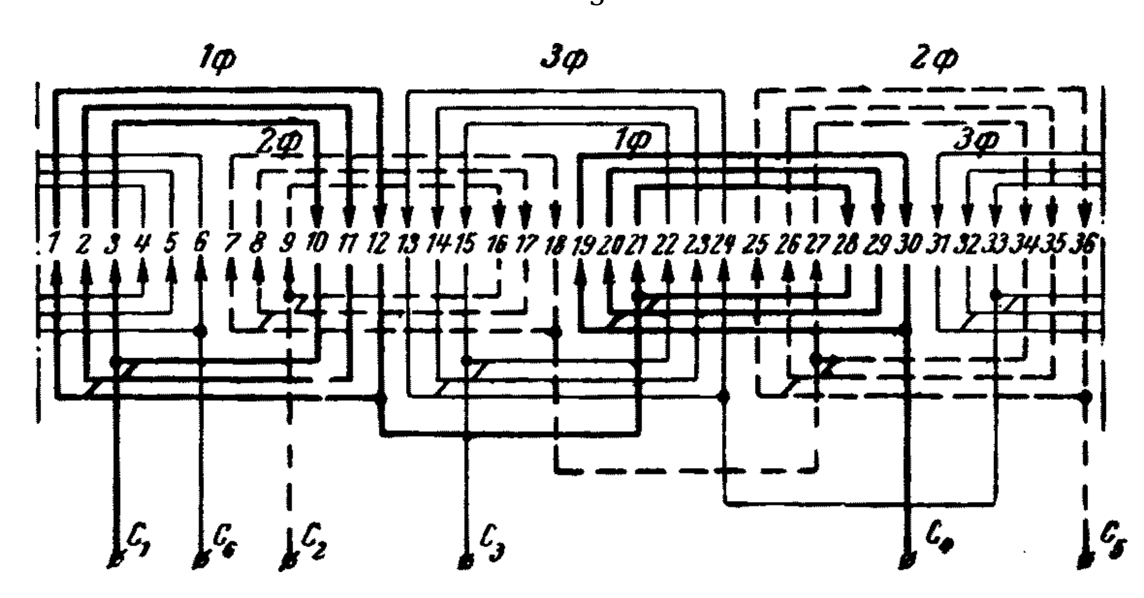


Рис. 45. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки.
Z = 36; $2p$ = 4; q = 3; y_1 = 7; y_2 = 9; y_3 = 11.

Вторую катушечную группу первой фазы укладывают так, чтобы левая сторона самой узкой катушки разместилась в пазу, отстоящем от начала 1–й катушечной группы на два диаметральных шага, т. е. в 21–м пазу. Вторая сторона этой катушки разместится через 2 × q пазов, т. е в 28–м пазу; левые стороны остальных двух катушек займут пазы 20–й и 19–й, а правые стороны – 29–й и 30–й.

Начала 2–й и 3–й фаз располагают друг от друга на расстоянии 2 × q, т. е. на 6 пазов, руководствуясь при этом теми же правилами, что и при укладке 1–й фазы.

Наносят соединительные линии между катушками катушечных групп во всех трех фазах, соединяют конец первой катушечной группы с началом второй катушечной группы и буквенными индексами обозначают начала и концы фаз, а направление токов в проводах обмотки стрелками, одновременно проверив правильность чередования полюсов.

в) Однослойные секционные трехфазные обмотки "в развалку" с целым q.

Пример. Составить схему обмотки статора двухполюсного электродвигателя. Дано: Z = 12; $2p$ = 2; q = 2; a = 1 (рис. 46). Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$
q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{12}{2 \times 3} = 2
$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$
n\text{к} = \frac{Z}{2} = \frac{12}{2} = 6, \;\; n\text{кг} = \frac{n\text{к}}{q} = \frac{6}{2} = 3
$$

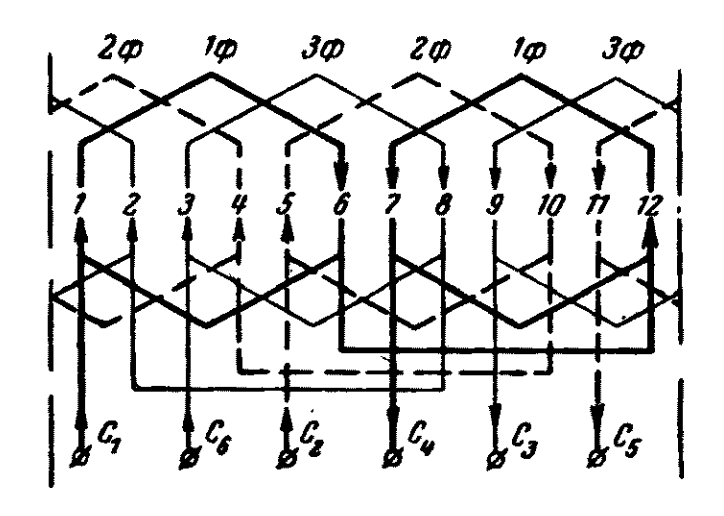


Рис. 46. Схема однослойной секционной обмотки "в развалку", Z = 12; 2p = 2; q = 2; y = 5.

На каждую фазу приходится по одной катушечной группе, состоящей из двух катушечных полугрупп, где последняя состоит из одной катушки.

Определяют шаг обмотки по пазам, проверив приемлемость для данной обмотки расстояния между сторонами катушек равного 2 × q = 2 × 2 = 4; тогда стороны первой катушки 1–й фазы займут 1–й и 6–й пазы. Для проверки правильности принятого шага можно пользоваться практическим способом.

Наносят на бумагу ряд вертикальных линий, обозначающих пазы, и проставляют номера пазов от единицы до числа, превышающего величину шага обмотки на несколько пазов. Размещают катушечную полугруппу в пазы согласно подсчитанному или заданному шагу, а в свободные пазы между сторонами катушечной полугруппы размещают катушечные полугруппы других фаз так, чтобы лобовые части рядом лежащих катушечных полугрупп выходили в противоположные стороны. Поскольку лобовые части левой стороны катушечной полугруппы 1–й фазы направлены вправо, лобовые части рядом лежащей катушечной полугруппы другой фазы должны быть направлены влево, а следующей катушечной полугруппы вправо и т. д. При правильном выборе шага должна получиться полная симметрия в расположении лобовых частей, а все пазы между сторонами катушечной полугруппы, принятой за первую, должны быть заняты катушечными полугруппами других фаз (рис. 47). Из такого построения (рис. 47, *б*) видно, что шаги 1 – 6 определены правильно.

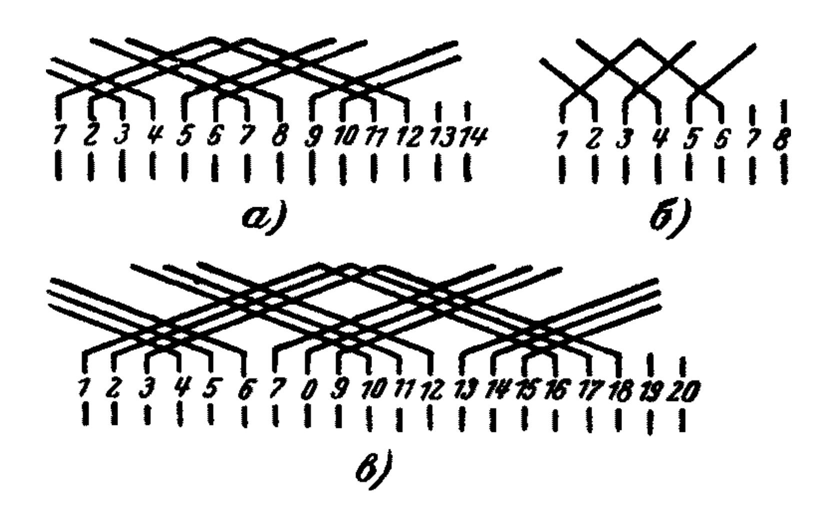


Рис. 47. Практический способ проверки правильности взятого шага по пазам в однослойной секционной обмотке "в развалку".

Вторую катушечную полугруппу 1–й фазы располагают так, чтобы левая сторона ее разместилась на расстоянии диаметрального шага от начала 1–й катушечной полугруппы, а правая в паз по шагу обмотки, т. е. в пазы 7–й и 12–й. Вычертив эту катушечную полугруппу, увидим, что левая ее сторона расположится рядом с правой стороной 1–й катушечной полугруппы. Такое расположение является общим для всех обмоток "в развалку", чем можно воспользоваться при составлении схем обмоток. Соединяют конец 1–й катушечной полугруппы с концом 2–й катушечной полугруппы. Определяют начала 2–й и 3–й фаз. Все начала фаз и в обмотке этого вида будут располагаться друг от друга на расстоянии 2 × q.
Если начало 1–й фазы (расположить в 1–м пазу, то начало 2–й фазы будет выходить из 6–го паза, а начало 3–й фазы – из 9–го паза.
Размещают катушечные полугруппы 2–й и 3–й фаз в соответствующих пазах аналогично размещению 1–й фазы и соединяют их в фазах.
На катушечных полугруппах фиксируют номера фаз и буквами обозначают выводные концы, указывают стрелками направления токов в проводах и проверяют правильность составленной схемы по полярности полюсов.

Пример. Составить схему однослойной секционной обмотки "в развалку". Дано: Z = 36; $2p$ = 4; a = 1 (рис. 48). Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

Определяют число катушек и катушечных групп в обмотке:

$$n\text{к} = \frac{Z}{2} = \frac{36}{2} = 18, \quad n\text{кг} = \frac{n\text{к}}{q} = \frac{18}{3} = 6$$

В каждой фазе катушечных групп будет: 6 : 3 = 2. Определяют число катушек в катушечной полугруппе. Так как q – нечетное число, катушечные полугруппы должны состоять из различного количества катушек: первая полугруппа каждой катушечной группы должна иметь (q + 1) : 2, а вторая полугруппа (q – 1) : 2 катушек. Подсчитывают число катушек в каждой полугруппе при q = 3. В первой полугруппе (3 + 1) : 2 = 2 катушки, а во второй (3 – 1) : 2 = 1 катушка.

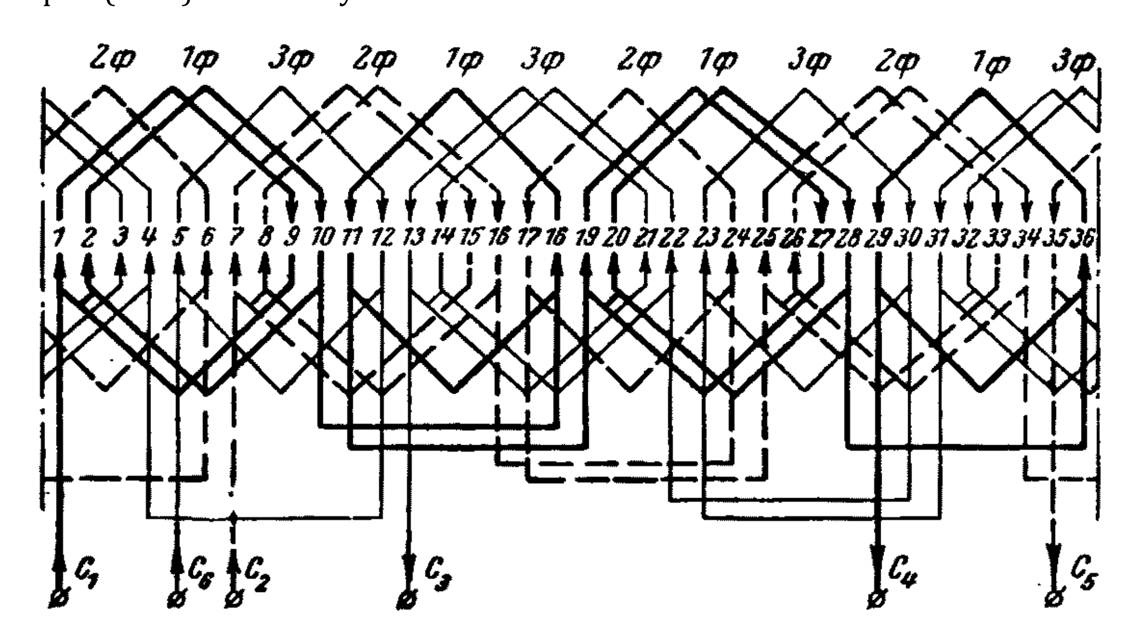


Рис. 48. Схема однослойной секционной обмотки "в развалку",
Z = 36; $2p$ = 4; q = 3; y_1 = 7; y_2 = 8.

Таким образом, в фазе будут 2 полугруппы с двумя катушками и 2 с одной катушкой. Первую катушечную полугруппу, состоящую из двух катушек, располагают в пазах где 1–й и 2–й пазы займет левая сторона, а правая сторона через 2 × q, или 6 пазов, займет 9–й и 10–й пазы. Следующая полугруппа первой катушечной группы, состоящая из одной катушки, левой стороной займет 11–й паз, а правая сторона через 2 × q займет 18–й паз.
Вторая катушечная группа займет: полугруппа с двумя катушками левой стороной 19–й и 20–й пазы, правой – 27–й и 28–й пазы и полугруппа с одной катушкой: левой стороной – 29–й, а правой – 36–й пазы. Соединение полугрупп производят по правилу "конец с концом, начало с началом", предварительно соединив последовательно катушки в полугруппах.
Начала фаз располагают через 2 × q равное 6 пазам: в 7–м пазу – начало 2–й фазы, в 13–м пазу – начало 3–й фазы, а соединения производят как в 1–й фазе.
Обозначим цифрами номера фаз, буквами – начала и концы фаз, разметим стрелками направление тока в проводах катушек и проверим полярность и чередование полюсов.
Рассматривая составленную схему мы увидим, что шаг по пазам обмотка имеет неодинаковый: в одних катушках y = 7, в других y = 8, однако принцип построении схемы от этого не нарушен.

г) Двухслойные трехфазные обмотки с целым q.

Пример. Составить схему обмотки статора двухполюсного электродвигателя (рис. 49).
Дано: Z = 12; 2p = 2; a = 1. Определяем число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{12}{2 \times 3} = 2$$

Определяем диаметральный шаг:

$$y\text{д} = \frac{Z}{2p} = \frac{12}{2} = 6$$

Берем укороченный шаг yу = 0,8 y = 0,8 × 6 = 5.
Определяем число катушек и число катушечных групп в обмотке: nк = Z = 12;

$$n\text{к} = Z = 12, \;\; n\text{кг} = \frac{n\text{к}}{q} = \frac{12}{2} = 6$$

На фазу приходятся две катушечные группы, в катушечной группе две катушки. Размещаем левую сторону первой катушечной группы в верхнюю часть 1–го и 2–го пазов, правую сторону – в нижнюю часть 6–го и 7–го пазов. Начало второй катушечной группы 1–й фазы располагаем от начала первой катушечной группы на расстоянии диаметрального шага. т. е. в 7–м пазу. Вторая катушечная группа займет пазы: левой стороной – верхнюю часть 7–го и 8–го пазов, правой стороной – нижнюю часть 12–го и 1–го пазов.
Соединяем катушки последовательно, катушечные группы – по правилу: "конец первой катушечной группы с концом второй катушечной группы, начало второй катушечной группы с началом третьей катушечной группы.
Размещаем начала 2–й и 3–й фаз: начало 2–й фазы должно находиться на расстоянии 2 × q от начала 1–й фазы и занимать 5–й паз; начало 3–й фазы должно отстоять от начала 2–й фазы также на 2 × q и занимать 9–й паз. Размещаем катушечные группы 2–й и 3–й фаз и делаем соединения катушечных групп.

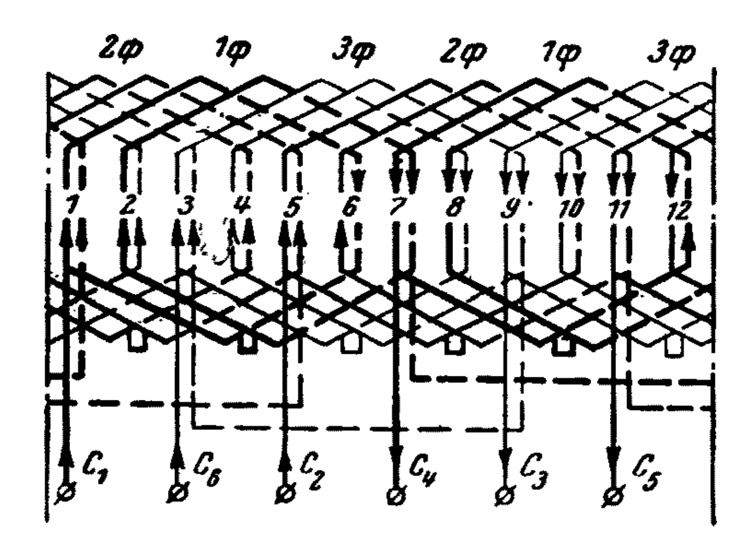


Рис. 49. Схема двухслойной обмотки, Z = 12; 2p = 2; q = 2; y = 5.

Обозначим номера фаз, начала и концы фаз, разметим направление токов в проводах катушек стрелками и проверим полярность полюсов.

Рассматривая схему обмотки, заметим, что в 6–м и 12–м пазах имеются встречные токи. Это не должно нас смущать, так как в двухслойных обмотках при укорочении шага на один паз будут встречные токи в одном пазу на каждый полюс, при укорочении на два паза встречные токи будут в двух пазах на каждый полюс и т. д.

Пример. Проверить правильность построения обмотки статора вычислением некоторых обмоточных данных (рис. 50). Дано: Z = 12; 2p = 4; a = 1; y = 2. Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{12}{4 \times 3} = 1$$

Число катушек в фазе:

$$\frac{n\text{к}}{m} = \frac{12}{3} = 4$$

Число катушечных групп в фазе:

$$\frac{n\text{к}}{q \times m} = \frac{12}{1 \times 3} = 4$$

Расстояние между началами фаз 2 × q = 2 × 1 = 2. Расстояние между началами катушечных групп в фазе – один диаметральный шаг, равный 3.

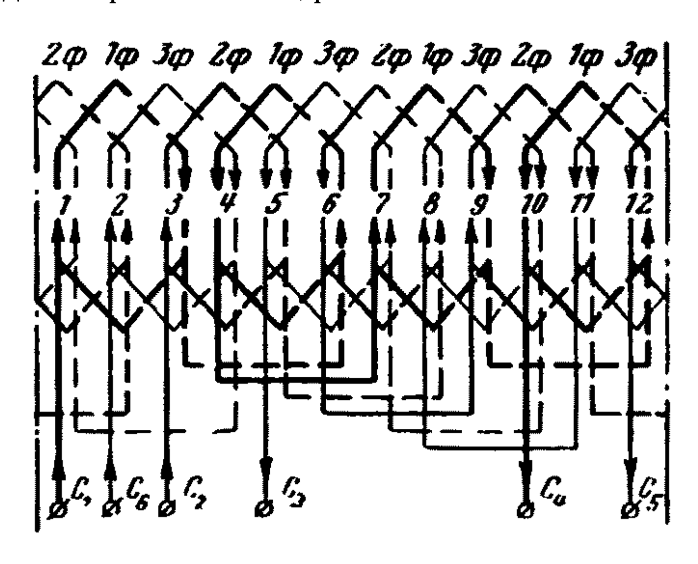


Рис. 50. Схема двухслойной обмотки, Z = 12; 2p = 4; q = 1; y = 2.

Пример. Составить схему обмотки статора четырехполюсного электродвигателя (рис. 51). Дано: $Z = 24$; $2p = 4$; $a = 4$, где a – число параллельных ветвей. Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{24}{4 \times 3} = 2$$

Число катушечных групп в фазе:

$$n\text{кг} = \frac{n\text{к}}{q} = \frac{24}{2} = 12$$

На каждую фазу приходится по четыре катушечные группы, в каждой катушечной группе две катушки. Определяют диаметральный шаг обмотки:

$$y\text{д} = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

Принимается укорочение шага на один паз: $y = 5$.
Левую сторону первой катушечной группы 1–й фазы укладывают в верхнюю часть 1–го и 2–го пазов, а правую сторону – в нижнюю часть 6–го и 7–го пазов.
Определяют пазы остальных катушечных групп 1–й фазы, начало которых должно отстоять от начала предыдущей на диаметральный шаг, эта вторая катушечная группа левой стороной займет верхнюю часть 7–го и 8–го пазов, а правой – нижнюю часть 12–го и 13–го пазов; третья катушечная группа левой стороной займет верхнюю часть 13–го и 14–го пазов, а правой – нижнюю часть 18–го и 19–го пазов; четвертая катушечная группа левой стороной займет верхнюю часть 19–го и 20–го пазов, а правой – нижнюю часть 24–го и 1–го пазов. Катушки катушечных групп соединяются, а фазы обозначаются соответствующим индексом. Соединений между катушечными групп не делается из–за наличия в обмотке четырех параллельных ветвей.
Определяют начала 2–й и 3–й фаз, расположенные через $2 \times q$ друг от друга. Начало 2–й фазы выйдет из 5–го паза, а начало 3–й фазы – из 9–го паза.

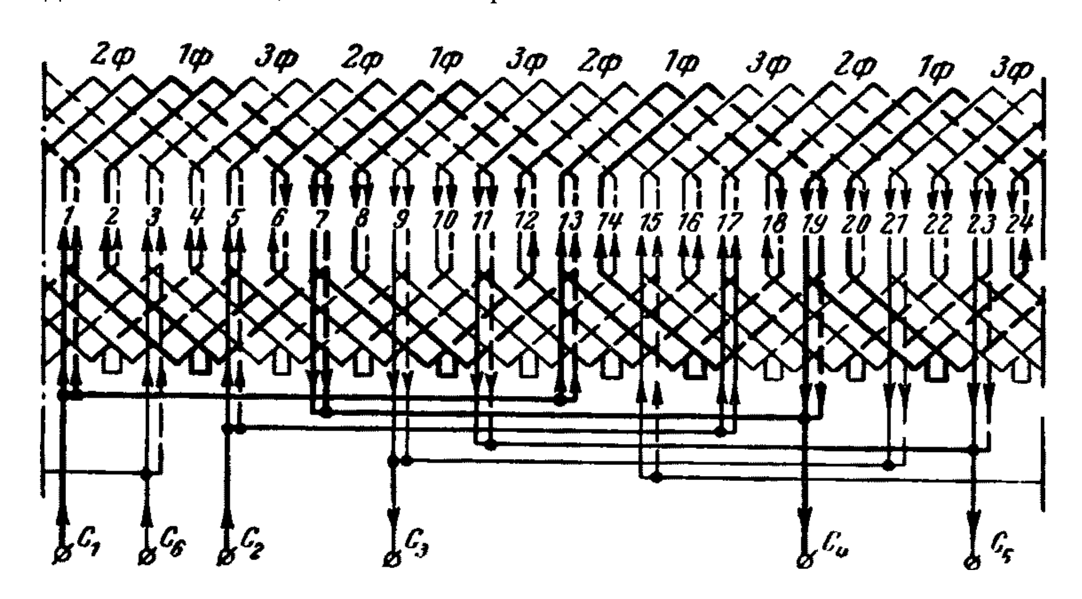


Рис. 51. Схема двухслойной обмотки, $Z = 24$; $2p = 4$; $q = 2$; $y = 5$; $a = 4$.

Катушечные группы 2–й и 3–й фаз располагаются аналогично размещению их в 1–й фазе, а на катушечных группах отмечают цифрами – номера фаз, буквами С1 С2, С3 – их начала, а стрелками направление токов в выводных концах.

Для образования четырех параллельных ветвей следует начало первой катушечной группы соединить с началом 3–й, концом 2–й и концом 4–й катушечных групп, а общий выводной провод будет началом фазы. Конец первой катушечной группы соединить с концом 3–й, началом 2–й и началом 4–й катушечных трупп, а общин выводной провод будет концом фазы.

Обозначив концы фаз буквами С4, С5, С6, проверяют правильность направления токов в проводах катушечных групп, соединительных и выводных проводах, полярность и чередование полюсов. Рассматривая направление токов в пазах, можно видеть, что в 6–м, 12–м, 18–м и 24–м пазах имеются встречные токи из–за укорочения шага обмотки на один паз, и поэтому на один полюс падает один паз со встречными токами.

д) Двухслойные и однослойные трехфазные обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, дробное q.

Дробное число пазов на полюс и фазу означает, что в данной обмотке число катушек в катушечных группах неодинаково, в одних катушечных группах число катушек на одну больше, чем в других. Дробное значение числа пазов на полюс и фазу обозначается индексом q и представляется в виде дроби (правильной):

$$q = b + \frac{c}{d}$$

где b – целое число; c – числитель дроби; d – знаменатель дроби. Число катушек в каждой фазе при двухслойной обмотке равно $2 \times p \times q$, а при однослойной $p \times q$.

При дробном q часть катушечных групп выполняется из числа катушек, равного $b + 1$, а часть – из b катушек.

При составлении схем с дробным q следует из соседних катушек, равном $b \times d + c$, образовать d катушечных групп, из которых c катушечных групп с числом катушек в группе равным $b + 1$ и $d - c$ катушечных групп с числом катушек в группе равным b.

Пример. Составить схему двухслойной обмотки статора, у которого $Z = 30$; $2p = 4$; $a = 1$. Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{30}{4 \times 3} = 2½ \quad (\text{рис.} \, 52)$$

где $b = 2$; $c = 1$; $d = 2$. Здесь часть катушечных групп состоит из $b + 1 = 2 + 1 = 3$ катушек, а часть из $b = 2$ катушек. Схему следует составить из $b \times d + c = 2 \times 2 + 1 = 5$ соседних катушек и образовать $d = 2$ катушечные группы, где $c = 1$ катушечная группа будет состоять из $b + 1 = 2 + 1 = 3$ катушек и $d - c = 2 - 1 = 1$ катушечная группа будет состоять из $b = 2$ катушек. Число катушек в фазе будет равно $2p \times q = 4 \times 2½ = 10$, число чередований катушечных групп в обмотке:

$$\frac{2p \times m}{d} = \frac{4 \times 3}{2} = 6$$

Таким образом, в цифровом выражении схема выглядит так:

(3 – 2) (3 – 2) (3 – 2) (3 – 2) (3 – 2) (3 – 2)

где цифры в скобках означают число катушек в катушечных группах, а скобки отделяют чередования (см. приложение 10 и рис. 52).

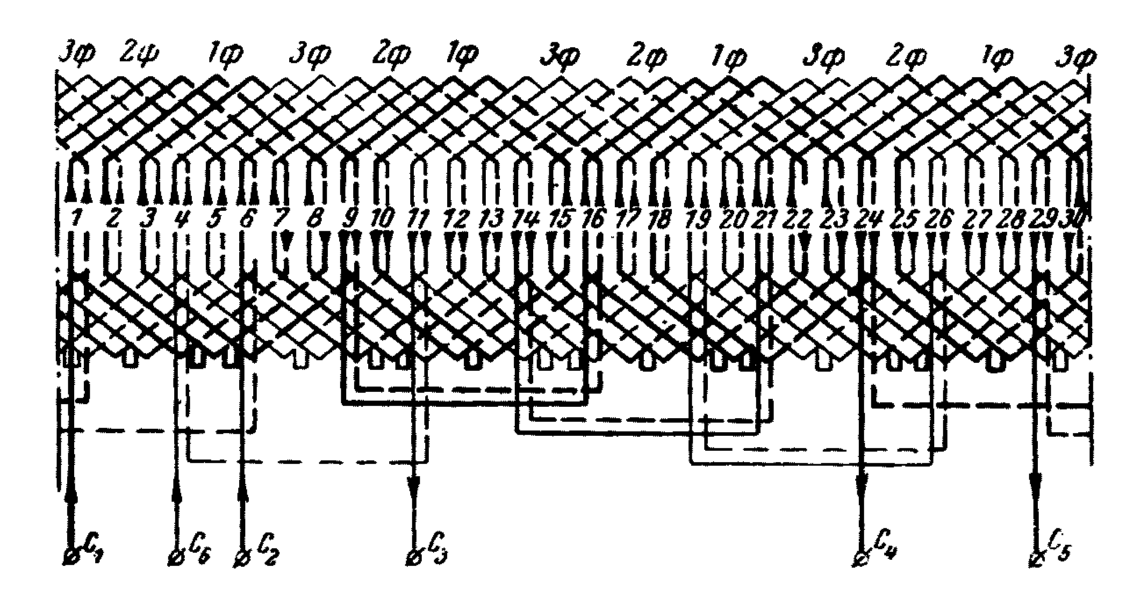


Рис. 52. Схема двухслойной обмотки. Z = 30; 2p = 4; q = 2½, y = 6.

Определяют шаг по пазам:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{30}{4} = 7{,}5$$

Принимается укороченный шаг y = 6. Если величина дробной части q равна ½ то расстоянии между началами фаз будут равны 2 × q = 2 × 2½ = 5 и начало второй фазы будет в 6–м, а начало 3–й в 11–м пазу. Если произведение 2 × q не будет равно целому числу, его следует округлить до ближайшего целого числа, что и принимается за расстояние между началами фаз. Для обмоток с дробным q диаметральный шаг обмотки также будет дробным, поэтому место катушечных групп в каждой фазе определяется в процессе построения схемы обмотки. Если одни катушечные группы состоят из трех катушек, а другие из двух катушек, то при одинаковом числе тех и других в фазе построение первой катушечной группы можно начать с любой, чередуя их при дальнейшем построении схемы в каждой фазе и обмотке в целом (см. приложение 10). Разместив первые катушечные группы всех фаз, каждая из которых состоит из трех катушек, укладывают следующую катушечную группу 1–й фазы, состоящую из двух катушек в 9–й и 10–й пазы. Дальнейшее построение обмотки упрощается тем, что чередование катушечных групп фаз уже определилось. Зная чередование катушечных групп фаз и чередование катушечных групп с двумя и тремя катушками в фазе, легко построить схему обмотки в целом, так как она ничем не отличается от построения обычных схем двухслойных обмоток.

Пример. Составить схему однослойной секционной обмотки четырехполюсного электродвигателя. Дано: Z = 18; 2p = 4; a = 1 (рис. 53). Определяют число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{18}{4 \times 3} = 1½ = b + \frac{c}{d}$$

где b = 1; c = 1; d = 2. При однослойной обмотке число катушек в фазе равно p × q = 2 × 1½ = 3. Часть катушечных групп будет состоять из b + 1 = 1 + 1 = 2 катушек, а часть из b = 1 катушки. Из соседних катушек b × d + c = 1 × 2 + 1 = 3 образуют d = 2 катушечные группы, из которых c = 1 катушечная группа состоит из b + 1 = 1 + 1 = 2 катушек и d – c = 2 – 1 = 1 катушечная группа состоит из b = 1 катушки. Число чередований катушечных групп в обмотке:

$$\frac{p \times m}{d} = \frac{2 \times 3}{2} = 3$$

В цифровом выражении схема обмотки выразится следующими данными:

(2 – 1) (2 – 1) (2 – 1)

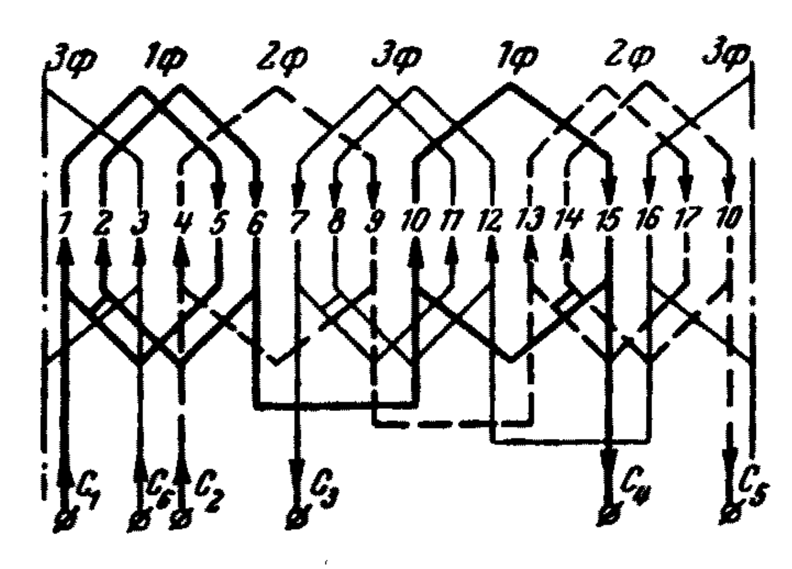


Рис. 53. Схема однослойной секционной обмотки, Z = 18; $2p$ = 4; q = 1½; y_1 = 4; y_2 = 5.

Определяют шаг обмотки по пазам:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{18}{4} = 4{,}5$$

Для катушечной группы из двух секций шаг y_1 = 4, а для катушечной группы из одной секции y_2 = 5. Начала фаз располагают на расстоянии 2 × q = 2 × 1½ = 3 паза, значит начало 2–й фазы будет в 4–м, а начало 3–й фазы – в 7–м пазу. Первые катушечные группы фаз располагают в пазах согласно принятым шагам, начала вторых катушечных групп фаз – на расстоянии двух диаметральных шагов от начала первых катушечных групп, т. е. 2 × 4,5 = 9 пазов. Дальнейшее построение схемы обмотки ничем не отличается от построения схем однослойных секционных обмоток.

Из приведенных примеров построения схем можно заключить следующее.

Во всех обмотках расстояние между началами фаз равно 2 × q. В обмотках, имеющих дробное q, произведение 2 × q может быть не целым числом. В этих случаях за 2 × q принимается ближайшее целое число.

В однослойных секционных обмотках с целым q расстояние между началами двух соседних катушечных групп одной и той же фазы равно двойному диаметральному шагу, а в двухслойных обмотках с целым q – только диаметральному шагу.

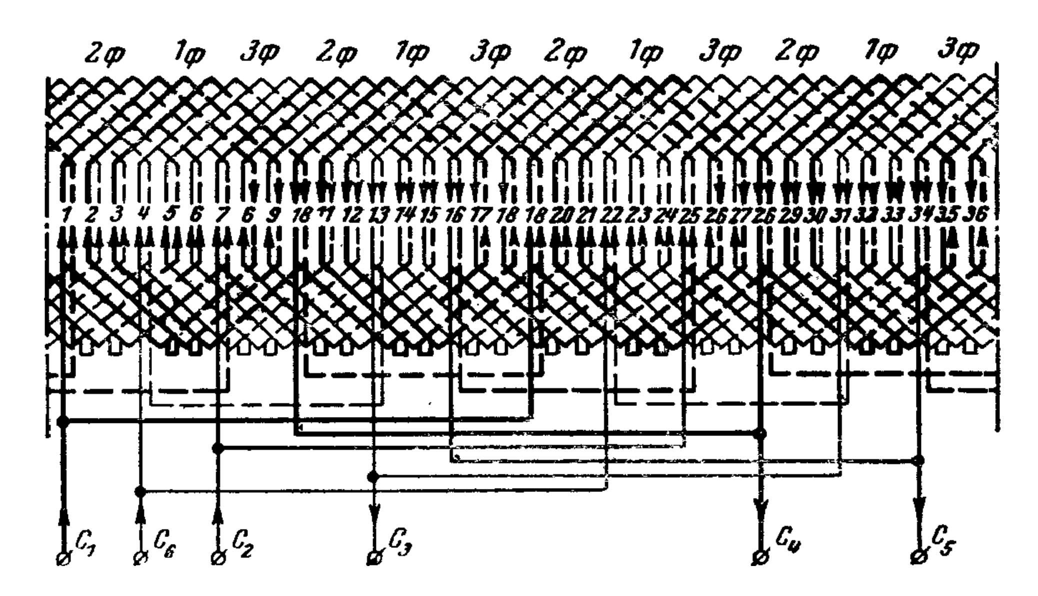
В однослойных секционных обмотках "в развалку" с целым q и одинаковым шагом по пазам расстояние между началами двух соседних катушечных полугрупп одной и той же фазы равно диаметральному шагу. В однослойных секционных и катушечных (концентрических) обмотках, включая обмотки "в развалку". между сторонами катушек каждой катушечной группы располагается 2 × q сторон катушек других фаз. Исключением являются обмотки с дробным q и некоторые однослойные секционные обмотки "в развалку", у которых стороны катушечных групп размещены не в рядом лежащих пазах, а вперемежку со сторонами катушечных групп других фаз (см. рис. 40).

В обмотках с дробным q, имеющих дробь ½, отпадает необходимость подсчитывать, сколько будет катушечных групп с числом катушек, равным b, и сколько будет катушечных групп с числом катушек, равным b + 1. Во всех обмотках, имеющих дробное $\boldsymbol{q}$ с дробью равной ½, числа катушечных групп с меньшим и большим количеством катушек распределяются поровну, и поэтому, зная число катушек в фазе, легко подсчитать, сколько будет больших и малых катушечных групп.

12. Применение схем при намотке обмоток.

Много имеется разновидностей обмоток электрических машин, поэтому даже опытный обмотчик не всегда запоминает построения той или иной схемы и перед началом намотки обычно вычерчивает схему для пользования. Наличие готовых схем обмоток дает возможность более квалифицированно и осмысленно выполнять намотку и повышает производительность труда, так как при работе обмотчик, посмотрев схему, сразу видит место расположения начал фаз, шаг обмотки, количество катушек в катушечной группе, их расположение, наличие параллельных ветвей и место расположения концов фаз. Опытному обмотчику достаточно взглянуть на схему обмотки перед работой, а начинающим и малоопытным обмотчикам полезно пользоваться схемой во время выполнения работы.

В целях изучения схем обмоток приводятся еще некоторые из них. На рис. 54 приведена схема однослойной секционной обмотки "в развалку", в которой число пазов Z = 36, число полюсов $2p$ = 4, число параллельных ветвей a = 2; число катушек в катушечной группе 3. Эта обмотка состоит из катушечных полугрупп с одной и двумя секциями, которые, располагаясь в фазе рядом, образуют q сторон, участвующих в создании полюса, что является характерным для обмоток "в развалку". Между сторонами катушечной полугруппы любой фазы размещено 2 × q сторон катушек других фаз. Поэтому и получается разный шаг по пазам: в полугруппах с одной секцией y_1 = 7, а с двумя секциями y_2 = 8. В каждую параллельную ветвь входят одна полугруппа с двумя секциями и одна с одной секцией. Обмотка выполнена так, что каждая фаза начинается с полугруппы с двумя секциями. Можно составить обмотку и так, чтобы каждая фаза начиналась с полугруппы с одной секцией, так как структура обмотки от этого не изменится.



Ряс. 55. Схема двухслойной обмотки. Z = 36; $2p$ = 4; q = 3; y = 7; a = 2.

На рис. 55 приведена схема двухслойной обмотки с числом пазов Z = 36, числом полюсов $2p$ = 4, числом параллельных ветвей a = 2. Укорочение шага здесь принято на два паза, поэтому на один полюс приходятся два паза со встречными токами (8–й, 9–й, 17–й, 18–й, 26–й, 27–й, 35–й, 36–й пазы), которые расположены симметрично (через девять пазов), что говорит о правильности составленной схемы. Следует иметь в виду, что расположение пазов со встречными токами в проводах, так же как и обозначение полярности полюсов, является действительным лишь для какого–то мгновения времени, так как по мере движения вращающегося магнитного поля по окружности расточки статора перемещаются и полюса и встречные токи в проводах обмотки.

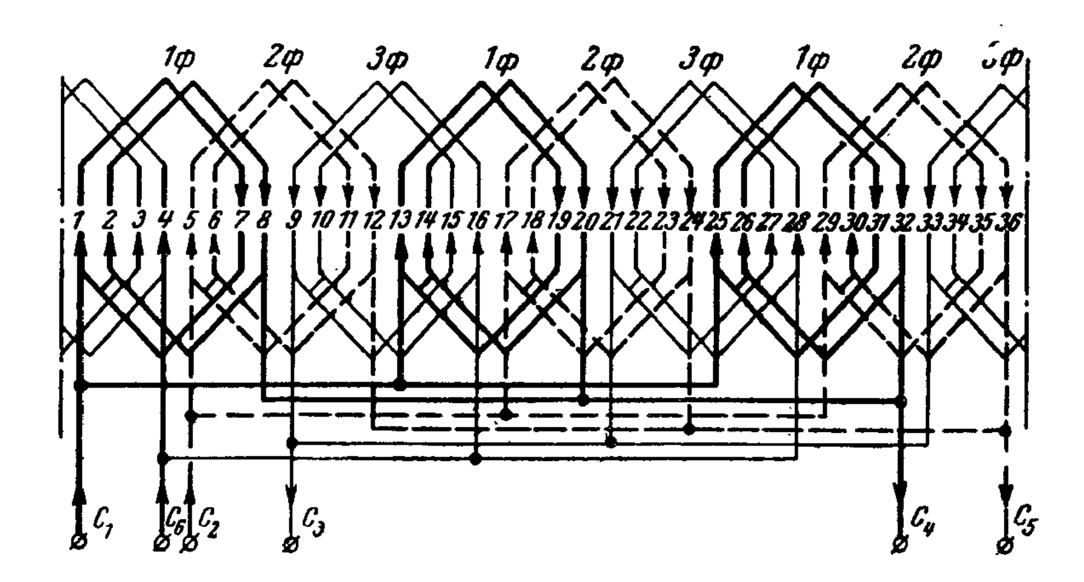


Рис. 56. Схема однослойной секционной обмотки, $Z = 36$; $2p = 6$; $q = 2$; $y = 6$; $a = 3$.

На рис. 56 приведена схема однослойной секционной обмотки электродвигателя с числом пазов $Z = 36$, числом полюсов $2p = 6$, числом параллельных ветвей $a = 3$, числом пазов на полюс и фазу $q = 2$ и диаметральным шагом обмотки, равным 6 ($y = 6$). Каждая фаза имеет три катушечные группы с двумя секциями, а в параллельной ветви – одну с двумя секциями.

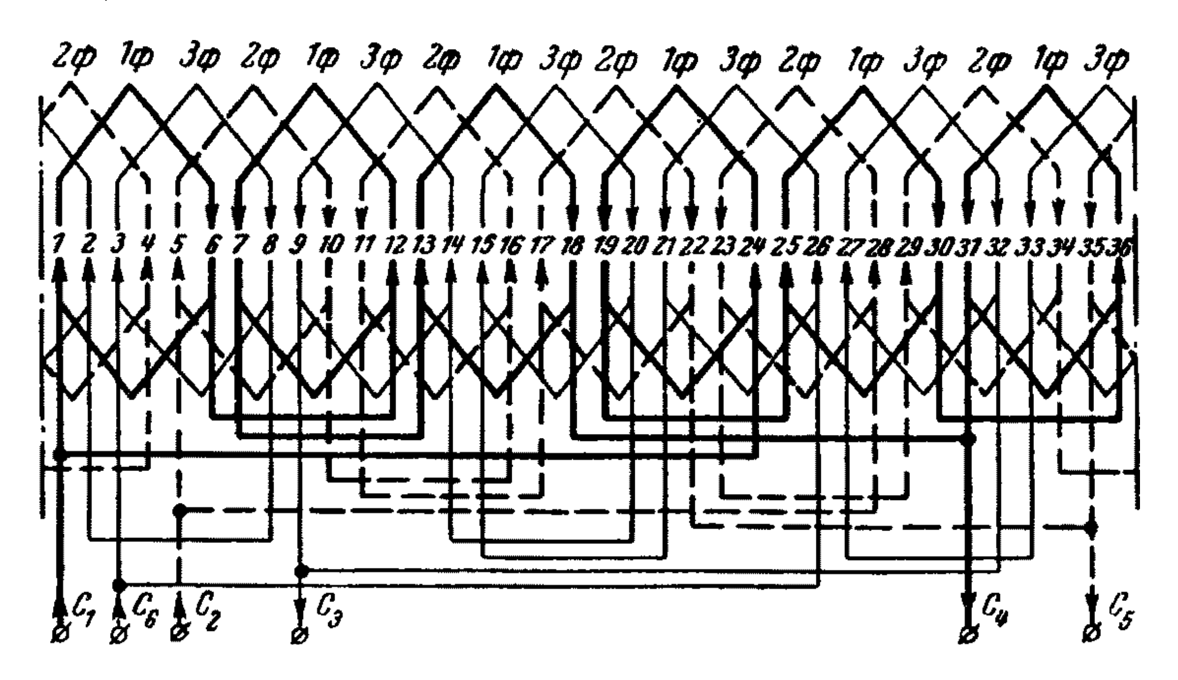


Рис. 57. Схема однослойной секционной обмотки "в развалку"
$Z = 36$; $2p = 6$; $q = 2$; $y = 5$; $a = 2$.

На рис. 57 приведена схема однослойной секционной обмотки "в развалку", у которой число пазов $Z = 36$, число полюсов $2p = 6$, число параллельных ветвей $a = 2$, число пазов на полюс и фазу $q = 2$ и число катушек в катушечной полугруппе равно 1. В параллельную ветвь входят три катушечные полугруппы. Данную обмотку можно выполнить без параллельных ветвей, с двумя параллельными ветвями, с тремя и шестью параллельными ветвями. При образовании параллельных ветвей необходимо, чтобы каждая параллельная ветвь имела одинаковое число катушечных групп или полугрупп и чтобы общее число катушек в каждой параллельной ветви было одинаковым.

Глава пятая
Конструирование обмоток статора асинхронных однофазных электродвигателей и виды обмоток.
13. Особенности конструирования обмоток статора асинхронных однофазных электродвигателей.

При конструировании обмоток статора асинхронных однофазных электродвигателей пользуются теми же основными принципами, что и при конструировании обмоток асинхронных трехфазных электродвигателей. Число катушек в катушечной группе, равное числу пазов на полюс и фазу q определяется по известной формуле:

$$q = \frac{Z}{2p \times m}$$

Однако при подсчете q для однофазных обмоток берут число пазов не всего статора, а то количество, которое фактически занимает данная обмотка (фаза). В однофазных двигателях с пусковыми элементами главная (рабочая) обмотка обычно занимает ⅔, а пусковая ⅓ общего числа пазов статора. Такое распределение пазов между обмотками позволяет устранить третью гармонику в кривой н. с. главной обмотки и экономически целесообразно.

Обозначив число пазов приходящееся на рабочую обмотку Za, а число пазов, приходящееся на пусковую обмотку Zb, получим формулы

для главной (рабочей) обмотки:

$$qa = \frac{Za}{2p \times m} = \frac{Za}{2p \times 1} = \frac{Za}{2p} \qquad (10)$$

для пусковой обмотки:

$$qb = \frac{Zb}{2p \times m} = \frac{Zb}{2p \times 1} = \frac{Zb}{2p} \qquad (11)$$

где qa – число пазов на полюс рабочей обмотки; qb – число пазов на полюс пусковой обмотки. В конденсаторных электродвигателях главная (рабочая) и вспомогательная обмотки занимают по половине всех пазов статора:

$$Za = Zb = \frac{Z}{2}$$

поэтому для этих обмоток $qa = qb$ (здесь qb – число пазов на полюс вспомогательной обмотки). Если при подсчете qa и qb обмоток конденсаторного электродвигателя брать не полное число пазов статора, а фактически занимаемое каждой в отдельности обмоткой, то можно пользоваться формулами (10) и (11), несмотря на то, что для конденсаторных электродвигателей число фаз $m = 2$.

Шаг по пазам однофазных обмоток определяется, так же как и для трехфазных:

$$y = \frac{Z}{2p}$$

где Z – число пазов статора. Шаг по пазам берут, как правило, укороченным. Так как однофазные и двухфазные обмотки в отличие от трехфазных могут создавать относительно сильную третью гармонику поля, которая может вызвать значительное искажение кривой вращающего момента затрудняющее пуск электродвигателя, то для уничтожения третьей гармоники и ее последствий обычно однофазные и двухфазные обмотки выполняют с шагом, равным ⅔ диаметрального.

В двухслойных обмотках шаг по пазам для рабочей и пусковой или вспомогательной обмоток берется одинаковым, а в однослойных обмотках шаг рабочей и пусковой обмоток может быть разным. За начала главной и вспомогательной обмоток берут выводы катушек, выходящих из пазов, расположенных по окружности статора на 90 эл. град., т. е. на половину полюсного деления, чем и осуществляется требуемый сдвиг обмоток в пространстве. У некоторых однофазных электродвигателей сдвиг между главной и вспомогательной обмотками может быть немного больше 90 эл. град, что объясняется невозможностью осуществить сдвиг обмоток на 90 эл. град при заданных числах полюсов, пазов и виде обмотки. Начало рабочей обмотки обозначают С1, конец – С2, начало пусковой или вспомогательной обмотки – П1, конец – П2.
Особенностью однофазной (рабочей) обмотки является то, что ее фазные зоны в 2 раза шире, чем трехфазной обмотки (120 эл. град под каждым полюсом).
В конденсаторных электродвигателях, которые по существу являются двухфазными, фазная зона как рабочей, так и вспомогательной обмоток в 1½ раза шире фазной зоны трехфазных обмоток и равна 90 эл. град.
В остальном схемы однофазных обмоток ничем существенным не отличаются от схем трехфазных обмоток. Соединение катушечных групп в однофазных обмотках "в развалку" и двухслойных производится по общему правилу построения трехфазных обмоток. В схемах комбинированных однослойных обмоток катушечные группы соединяют между собой так, чтобы получилось требуемое число полюсов при одинаковом по возможности числе сторон катушек, принимающих участие в образовании каждого полюса. При соединении катушечных групп в параллельные ветви необходимо придерживаться всех требований, которые были изложены для трехфазных обмоток.
Особенностью пусковых обмоток однофазных электродвигателей со встроенным пусковым сопротивлением является то, что каждая катушка имеет некоторое число витков намотанных встречно (бифилярно) для получения бифилярной катушки. Наличие бифилярных катушек уменьшает общее число эффективных витков (или эффективных проводов) в обмотке, уменьшает величину индуктивного сопротивления, оставляя без изменения величину активного сопротивления. Если, например, в катушке всего витков 116, а встречно намотано 18, то число эффективных витков в катушке будет 80, так как:

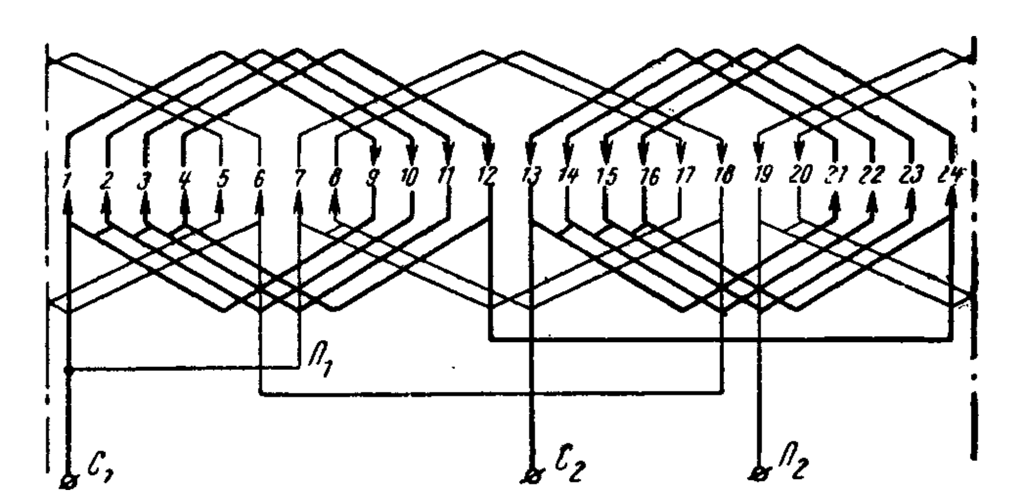
$$w\text{эфф} = w\text{пол} - 2 \times w\text{биф} = 116 - 2 \times 18 = 80$$

где wбиф – число встречных витков, образующих с таким же количеством витков прямой намотки бифилярную катушку.

14. Виды обмоток.

Обмотки асинхронных однофазных электродвигателей, так же как и трехфазных, могут быть однослойными и двухслойными. Однослойные обмотки чаще всего выполняются катушечными (концентрическими), а двухслойные – петлевыми секционными.
Обмотки конденсаторных электродвигателей выполняются чаще всего двухслойными.
В однофазных электродвигателях применяются также специальные обмотки. К ним относятся, например, "синусные" обмотки, которые по своему исполнению сочетают основные черты однослойных и двухслойных обмоток. По форме катушек "синусные" обмотки подобны однослойным катушечным (концентрическим) обмоткам, но во всех или в большинстве пазов располагаются две секционные стороны, как в двухслойных обмотках (см. рис. 68). Характерным для "синусных" обмоток является то, что их катушки выполняются с разным числом витков, а распределение проводников по пазам подчинено определенному графику, где для каждого паза указаны число проводников рабочей и число проводников вспомогательной (пусковой) обмоток.

Преимуществом "синусной" обмотки является то, что она в связи с определенным распределением проводников по пазам улучшает форму кривой магнитного поля, приближая ее к синусоидальной. На рис. 58 приведена схема однослойной секционной обмотки "в развалку" двухполюсного однофазного электродвигателя, подключаемого к однофазной сети через пусковой элемент (активное сопротивление, индуктивное сопротивление, емкость).



Рте. 58. Схема однослойной секционной обмотки "в развалку" однофазного электродвигателя с пусковым элементом, $Z = 24$; $2p = 2$; $qa = 8$; $qb = 4$; $ya = 8$; $yb = 10$.

Число всех пазов 24, число пазов на полюс, а следовательно, и число катушек в катушечной группе рабочей обмотки $qa = 8$, пусковой $qb = 4$, так как $Za = 16$, $Zb = 8$. Как и во всех обмотках "в развалку", здесь вместо катушечных групп размещены на статоре катушечные полугруппы с половинным числом катушек, приходящихся на полюс, а соединения катушечных полугрупп выполнены так, чтобы фазная зона состояла из q катушечных сторон ("конец с концом, начало с началом"). На один паз приходится 15 эл. град., фазная зона рабочей обмотки занимает, как и должно, 120 эл. град., сдвиг между рабочей и пусковой обмотками составляет 90 эл. град. Шаг по пазам рабочей обмотки $ya = 1 – 9$, пусковой $yb = 1 – 11$. В обмотках "в развалку" однофазных электродвигателей шаг выбирается таким, чтобы катушечная полугруппа рабочей обмотки охватывала qb сторон катушек пусковой обмотки, а катушечная полугруппа пусковой обмотки охватывала qa сторон рабочей обмотки.

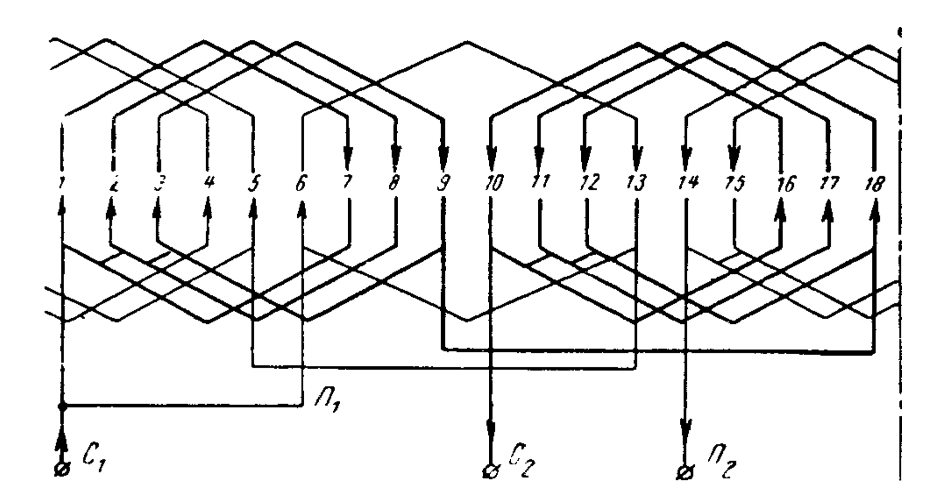


Рис. 59. Схема однослойной секционной обмотки "в развалку" однофазного электродвигателя с пусковым элементом.
$Z = 18$; $2p = 2$; $qa = 6$; $qb = 3$; $ya = 6$; $y_1b = 7$; $y_2b = 8$.

На рис. 59 приведена схема однослойной секционной обмотки "в развалку" двухполюсного однофазного электродвигателя, подключаемого к сети через пусковой элемент. Число всех пазов 18, число пазов на полюс рабочей обмотки *qa* = 6, пусковой *qb* = 3. Здесь катушечная группа пусковой обмотки имеет нечетное число катушек, поэтому одна катушечная полугруппа состоит из двух катушек, а другая – из одной катушки. По этой же причине катушечные полугруппы пусковой обмотки имеют разные шаги по пазам (y_1b = 7; y_2b = 8). Сдвиг по статору между рабочей и пусковой обмотками 100 эл. град. В остальном обмотка на рис. 59 подобна обмотке на рис. 58.

К числу наиболее распространенных обмоток однофазных электродвигателей относится однослойная катушечная (концентрическая) обмотка "в развалку" электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением. В качестве примера приведена схема обмотки четырехполюсного электродвигателя АОЛБ 31/4 (рис. 60) мощностью 0,27 *квт*. Данные обмотки: *Z* = 24; 2*p* = 4; *Za* = 16; *Zb* = 8; *qa* = 4; *qb* = 2. Ширина фазной зоны 120 эл. град., сдвиг между рабочей и пусковой обмотками 90 эл. град. В целях увеличения активного сопротивления пусковая обмотка выполнена с бифилярными катушками. Каждая из четырех катушек пусковой обмотки состоит фактически из двух катушек; одну можно назвать активной в смысле участия ее в создании магнитного потока, другую – бифилярной, так как она выполнена бифилярно; последняя в создании магнитного потока не участвует.

Для получения бифилярной катушки необходимо уложить в одни и те же два паза две катушки (секции), одна из которых должна быть повернута на 180°. При одинаковом числе витков в обеих секциях вся катушка будет бифилярной, при разном числе витков катушка будет состоять как бы из двух катушек – активной и бифилярной. Для того чтобы получить в каждой катушке пусковой обмотки указанного выше электродвигателя 76 заданных эффективных витков при 114 полных витках, следует уложить в соответствующие пазы одну поверх другой две катушки (секции): одну с числом витков (114 – 76) : 2 = 38 : 2 = 19, другую – с числом их 114 – 19 = 95, развернув одну из них на 180°. Бифилярная катушка в этом случае будет состоять из 114 – 76 = 38 витков, активная – из 114 – 38 = 76 витков. На схеме обмотки (рис. 60) из 9–го, 10–го, 21–го и 22–го пазов выходят петли получившиеся при разворачивании катушек на 180°. В каждом пазу, где расположена пусковая обмотка, ток проходит по одной части проводов в одном направлении, а по другой – в обратном. Полярность полюсов определяет ток того направления, в котором он проходит по большему числу проводников.

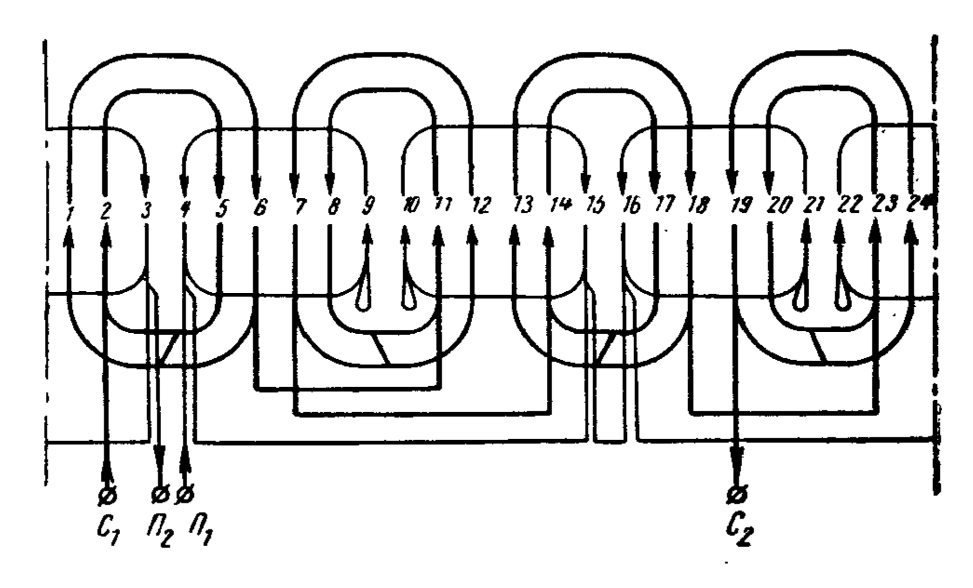


Рис. 60. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки "в развалку" однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением.
Z = 24; 2*p* = 4; *qa* = 4; *qb* = 2; y_1a = 3; y_2a = 5; *yb* = 5.

На рис. 61 приведена круговая схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки "в развалку" однофазного четырехполюсного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением. Данные этой обмотки те же, что и обмотки приведенной на рис. 60. На круговой схеме нагляднее показаны секции, образующие попарно бифилярную и активную катушки. На рис. 60 и 61 развернутыми на 180° оказались секции с бо́льшим числом витков; они и определили направление тока в катушках. Исходя из этого, секции с бо́льшим числом витков часто называют основными, а с меньшим числом витков – бифилярными.

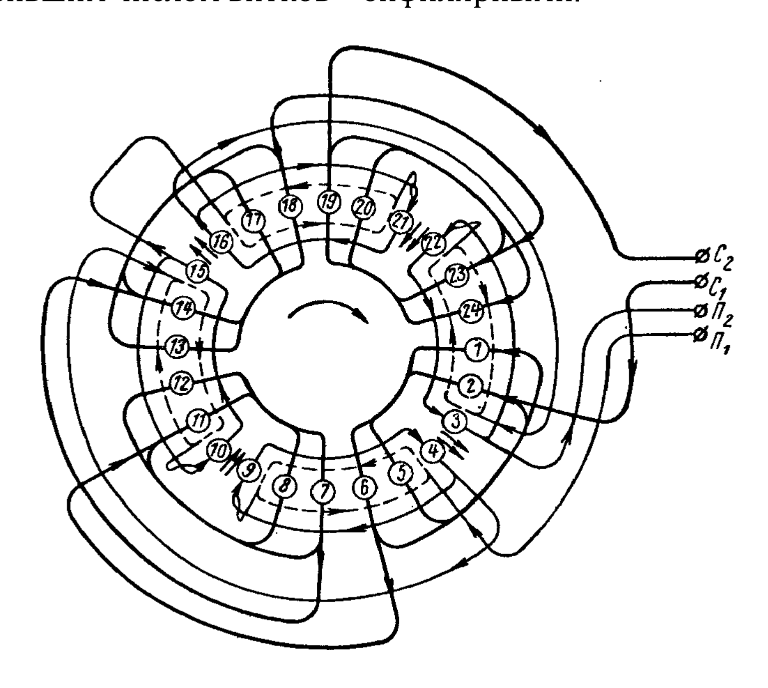


Рис. 61. Круговая схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки "в развалку" однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением.
$Z = 24$; $2p = 4$; $qa = 4$; $qb = 2$; $y_1a = 3$; $y_2a = 5$; $yb = 5$.

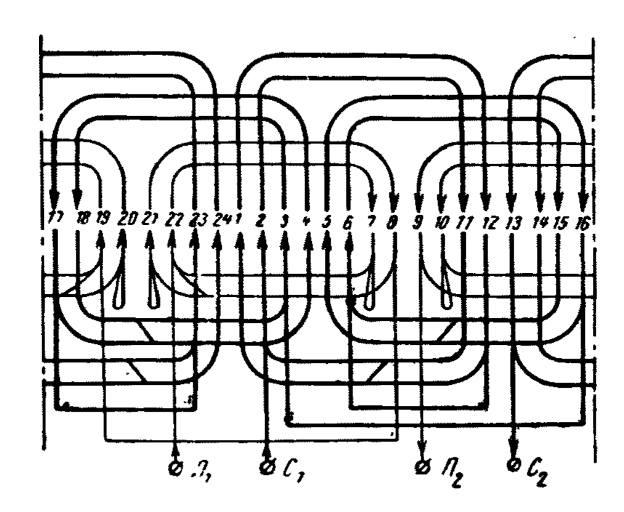


Рис. 62. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением.
$Z = 24$; $2p = 2$; $qa = 8$; $qb = 4$; $y_1a = y_1b = 9$; $y_2a = y_2b = 11$.

Рассмотрим схему однослойной катушечной (концентрической) обмотки однофазного двухполюсного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением, например электродвигателя АОЛБ 31/2 мощностью 0,4 *квт*. (рис. 62). Данные обмотки: $Z = 24$; $2p = 2$; $Za = 16$; $Zb = 8$; $qa = 8$; $qb = 4$. Сдвиг между рабочей и пусковой обмотками 120 эл. град. Здесь за начало рабочей обмотки следует считать 1–й паз, за начало пусковой обмотки – 21–й паз; сдвиг 20 пазов.

На один паз приходится (360° × p) : Z = (360° × 1) : 24 = 15 эл. град. Сдвиг, выраженный в электрических градусах, будет: 15° × 20 = 300°. Вычтя из 300 эл. град. 90°× 2, получим 120 эл. град.
Следовательно, в этой обмотке имеем отклонение от требуемого теоретически пространственного сдвига между рабочей и пусковой обмотками (90 эл. град), вызванное уступкой технологическим требованиям выполнения обмотки.
В обмотках "в развалку" каждая катушечная полугруппа рабочей обмотки должна была состоять из четырех катушек, что вызвало бы при намотке значительное удлинение лобовых частей. Фактически рабочая обмотка выполнена комбинированной: часть двойных катушек соединена по правилу "конец с концом, начало с началом", а часть – "конец с началом". Пусковая обмотка выполнена "в развалку". Каждая катушечная полугруппа пусковой обмотки состоит из двух катушек, а каждая катушка выполнена из двух секций и включает бифилярную и активную катушки. По направлению тока в катушках пусковой обмотки видно, что развернутыми на 180° оказались секции с меньшим числом витков. Петли бифилярной обмотки выходят с 7–го, 10–го, 20–го и 21–го пазов. На рис. 63 приведена схема двухслойной обмотки однофазного двухполюсного двигателя с пусковым элементом.

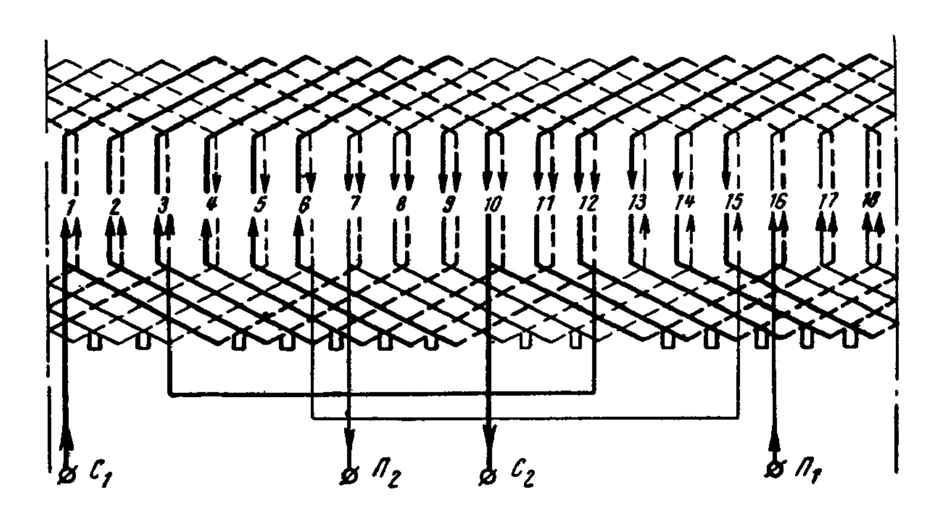


Рис. 63. Схема двухслойной обмотки однофазного электродвигателя с пусковым элементом, Z = 16; 2p = 2; qa = 6; qb = 3; ya = yb = 6.

Данные обмотки: Z = 18; 2p = 2; Za = 12; Zb = 6; qa = 6; qb = 3. Шаг по пазам рабочей и пусковой обмоток ya = yb = 6, при диаметральном шаге 9. Сдвиг между рабочей и пусковой обмотками 120 эл. град. (300° – 90° × 2 = 120°). Каждая катушечная группа рабочей обмотки состоит из шести катушек, а пусковая – из трех.
До сих пор мы рассматривали однослойные и двухслойные обмотки асинхронных однофазных электродвигателей с внешним (вынесенным) или встроенным пусковым элементом. Рассмотрим теперь обмотки однофазных конденсаторных электродвигателей.
На рис. 64 приведена схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки "в развалку" конденсаторного электродвигателя для магнитофонов типа ДВА–УЗ. Данные обмотки: Z = 24; 2p = 4; Za = Zb = 12; qa = qb = 3; y_1a = y_1b = 4; y_2a = y_2b = 6. Ширина фазной зоны 90 эл. град., сдвиг между рабочей и конденсаторной обмотками 90 эл. град. Так как обмотка (рис. 64) выполнена "в развалку" и на катушечную полугруппу приходится 3/2 = 1½ катушки, то все катушки рабочей и конденсаторной обмотки, имеющие шаг 6, разделены на две части с половинным числом витков в секции и образуют так называемые "расчесанные" катушки. Соединения между катушечными полугруппами как рабочей, так и конденсаторной обмоток выполнены по правилам построения обмоток "в развалку".

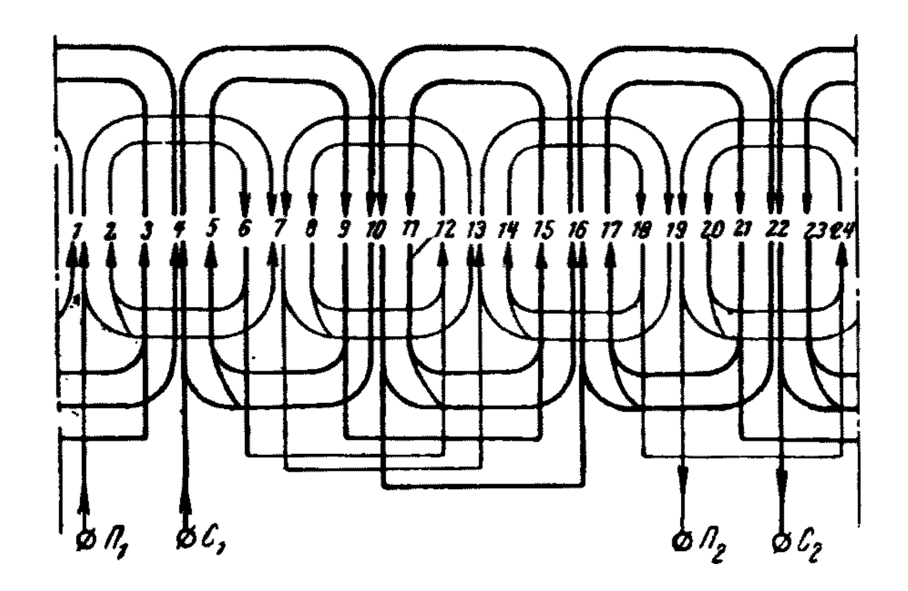


Рис. 64. Схема однослойной катушечной (концентрической) обмотки "в развалку" однофазного конденсаторного двигателя,
$Z = 24$; $2p = 4$; $qa = qb = 3$; $y_1a = y_1b = 4$; $y_2a = y_2b = 6$.

На рис. 65 приведена схема однослойной секционной комбинированной обмотки однофазного конденсаторного двигателя ДВА–У4. Данные обмотки: $Z = 24$; $2p = 8$; $Za = Zb = 12$; $qa = qb = 1½$; $ya = yb = 3$; ширина фазной зоны неодинакова; чередуется ширина – 120 и 60 эл. град.; в среднем получается 90 эл. град. Сдвиг между рабочей и конденсаторной обмотками 120 эл. град. Дробное число пазов на полюс явилось причиной того, что обмотка выполнена комбинированной, она имеет признаки обычной секционной обмотки "в развалку" и двухслойной обмотки.

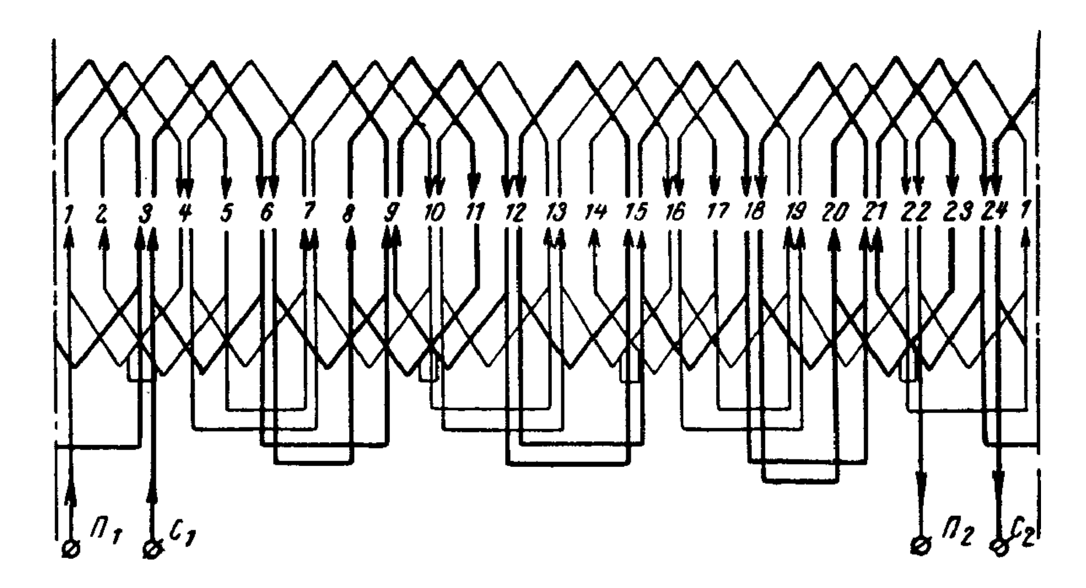


Рис. 65. Схема однослойной секционной обмотки (комбинированной) однофазного конденсаторного двигателя, $Z = 24$; $2p = 8$; $qa = qb = 1½$; $ya = yb = 3$.

В рабочей и конденсаторной обмотках имеется по две целых и восемь половинных катушек. Соединение катушек выполнено по правилу "конец с концом, начало с началом". Рассмотренная выше обмотка (рис. 65) предусмотрена для электродвигателя напряжением 220 *в*. На рис. 66 приведена подобная обмотка, но с двумя параллельными ветвями, применяемая в конденсаторном двигателе ДВА–У4 напряжением 110 *в*. В разработанной и внедряемой в настоящее время в производство единой серии однофазных электродвигателей типа АВЕ широкое применение получила двухслойная обмотка.

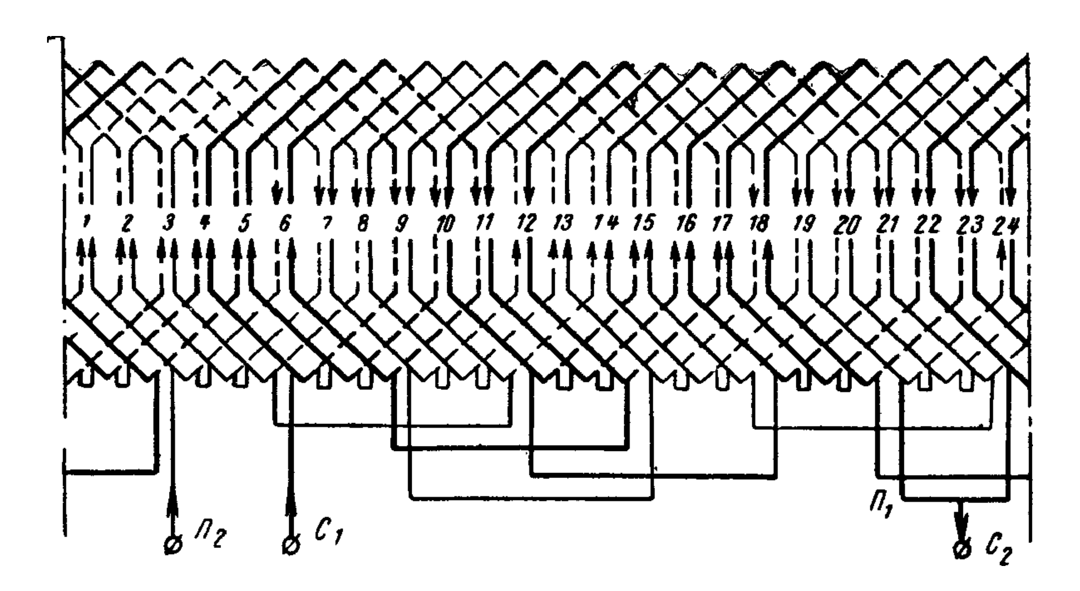


Рис. 67. Схема двухслойной обмотки однофазного конденсаторного двигателя.
$Z = 24$; $2p = 4$; $qa = qb = 3$; $ya = yb = 5$.

На рис. 67 приведена схема двухслойной обмотки однофазного конденсаторного электродвигателя типа АВЕ–071, предназначенного в основном для привода стиральных машин и призванного заменить однофазные двигатели типа АОЛБ второго габарита. Данные обмотки: $Z = 24$; $2p = 4$; $Za = Zb = 12$; $qa = qb = 3$; $ya = yb = 5$. Ширина фазной зоны 90 эл. град.; сдвиг между рабочей и конденсаторной обмотками 90 эл. град., так как на один паз приходится $(360° \times p) : Z = (360° \times 2) : 24 = 30$ эл. град., а начало рабочей и конденсаторной обмоток расположены на расстоянии 15 пазов $(30° \times 15 - 90° \times 4 = 90$ эл. град.). В рабочей и конденсаторной обмотках по четыре катушечные группы; каждая катушечная группа состоит из трех катушек. Соединение катушечных групп выполнено по известному правилу для двухслойных обмоток. Для получения заданного направления вращения электродвигателя (по часовой стрелке) при принятом на заводе–изготовителе порядке намотки статора выводы С2 и П1 показаны соединенными в лобовой части обмотки. Выше говорилось о преимуществах специальных "синусных" обмоток по сравнению с обычными. На рис. 68 представлена схема "синусной" обмотки однофазных электродвигателей типов ДХМ–3 и ДХМ–5, применяемых в домашних холодильниках.

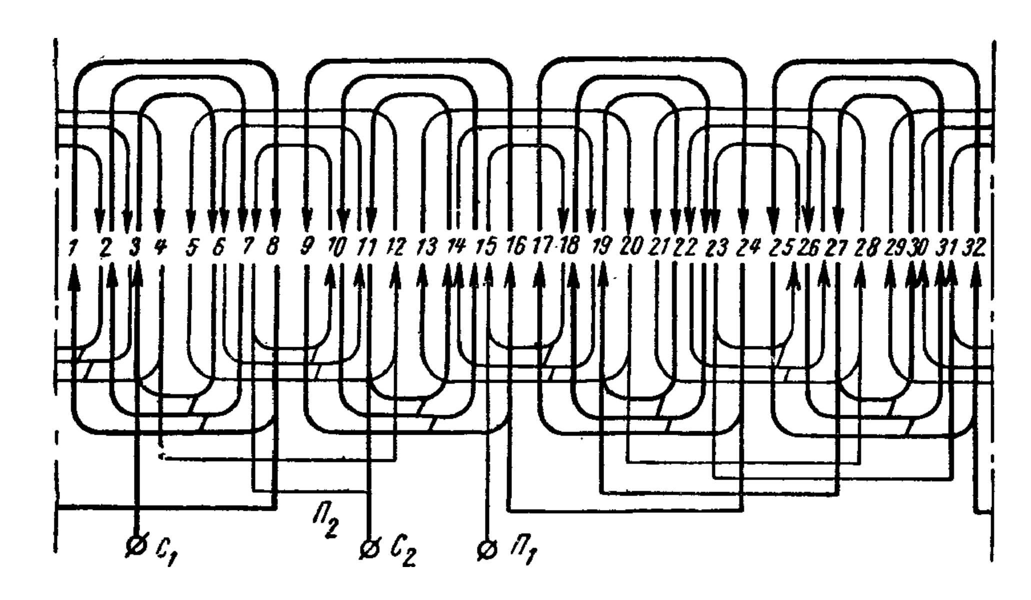


Рис. 68. Схема "синусной" обмотки однофазного электродвигателя с пусковой обмоткой, $Z = 32$; $2p = 4$; $y_1a = y_1b = 3$; $y_2a = y_2b = 5$; $y_3a = y_3b = 7$.

Данные обмотки: $Z = 32$; $2p = 4$; $y_1a = y_1b = 3$; $y_2a = y_2b = 5$; $y_3a = y_3b = 7$. Сдвиг между рабочей и пусковой обмотками 90 эл. град. (22,5° × 12 – 90° × 2= 90°). Рабочая и пусковая обмотки выполнены катушечными (концентрическими); катушечные группы состоят из трех катушек каждая. По технологии сначала укладывают рабочую обмотку в нижнюю часть пазов статора, а потом пусковую – в верхнюю часть пазов, что облегчает ремонт пусковой обмотки, которая чаще оказывается поврежденной. Четыре катушки с шагом $y = 7$ рабочей и четыре катушки пусковой обмотки занимают своими сторонами по целому пазу. В остальных пазах расположено по две стороны катушек. Рабочая обмотка двигателя ДХМ–5 (на 220 *в*) выполнена из провода диаметром 0,67 *мм*., имеет 1240 витков и омическое сопротивление 13,7 *Ом*, пусковая обмотка выполнена из провода диаметром 0,29 *мм*., имеет 692 витка и омическое сопротивление 36,5 *Ом*. Значительная разница в активных сопротивлениях рабочей и пусковой обмоток наряду с некоторой разницей в индуктивных сопротивлениях обусловливает необходимый сдвиг токов во времени для получения вращающегося магнитного поля в данном электродвигателе.

15. Схемы обмоток многоскоростных электродвигателей единой серии А, АО и новой единой серии А2, АО2.

Асинхронные электродвигатели, у которых скорость вращения регулируется посредством изменения числа полюсов обмотки статора, носят название многоскоростных. Многоскоростные электродвигатели серий А, АО и А2, АО2 выполняются с двумя, тремя и четырьмя скоростями при 4/2, 6/4, 8/4, 12/6, 6/4/2, 8/6/4 и 12/8/6/4 полюсах. Двухскоростные электродвигатели с отношением чисел полюсов (меньшего к большему) 1 : 2, например при скоростях вращения 3000/1500, 1500/750, 1000/500 *об. мин*., выполняются с одной обмоткой статора, которую с помощью специального переключателя переключают на два различных числа полюсов. Обмотки, позволяющие производить переключение одного числа полюсов на другое носят название полюсно–переключаемых или двухскоростных.

Новая единая серия электродвигателей А2 и АО2 имеет шкалу мощностей: 0,6; 0,8; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 10; 13; 17; 22; 30; 40; 55; 75; 100 *квт*. Применение обмоточных эмалированных проводов повышенной нагревостойкости, а также пазовой н междуфазной изоляции высокого качества позволило повысить *кпд* на 1,7% и снизить вес электродвигателей примерно на 15% по сравнению с равноценными по мощности электродвигателями серии А и АО. Наряду с электродвигателями основного исполнения в классификацию асинхронных трехфазных электродвигателей серии А2 и АО2 включены: электродвигатели с алюминиевой оболочкой; электродвигатели с алюминиевой обмоткой; многоскоростные; электродвигатели различных модификаций и специализированных исполнений.

Двухскоростные электродвигатели с отношением чисел полюсов, не равным 1 : 2, например при скоростях вращения 1500/1000 *об. мин*. и числе полюсов 4/6, выполняются с двумя обычными, электрически не связанными обмотками, где каждая рассчитана на одно число полюсов.
Трехскоростные двигатели с числом полюсов 6/4/2 и 8/6/4 выполняются с двумя обмотками: одна – двухскоростная для переключения чисел полюсов в отношении 1 : 2 (4/2 и 8/4 соответственно) и другая – обычная обмотка на 6 полюсов.
Четырехскоростные электродвигатели с числом полюсов 12/8/6/4 выполняются с двумя независимыми двухскоростными обмотками, каждая с переключением полюсов в отношении 1 : 2 (12/6 и 8/4).

В многоскоростных электродвигателях ротор выполняется обычно короткозамкнутым. Применение ротора с фазной обмоткой и контактными кольцами значительно усложнило бы конструкцию электродвигателя и потребовало бы дополнительного переключателя для изменения числа полюсов обмотки ротора соответственно изменению числа полюсов обмотки статора. Многоскоростные электродвигатели изготовляются для работы от сети напряжением 220, 380 и 500 *в*.

Переключение чисел полюсов в отношении 1 : 2 в двухскоростной обмотке осуществляется путем изменения направления тока в половине катушечных групп обмотки. Для этой цели каждую фазу обмотки разбивают на две части, в одну из которых входят все четные катушечные группы, а в другую – все нечетные.

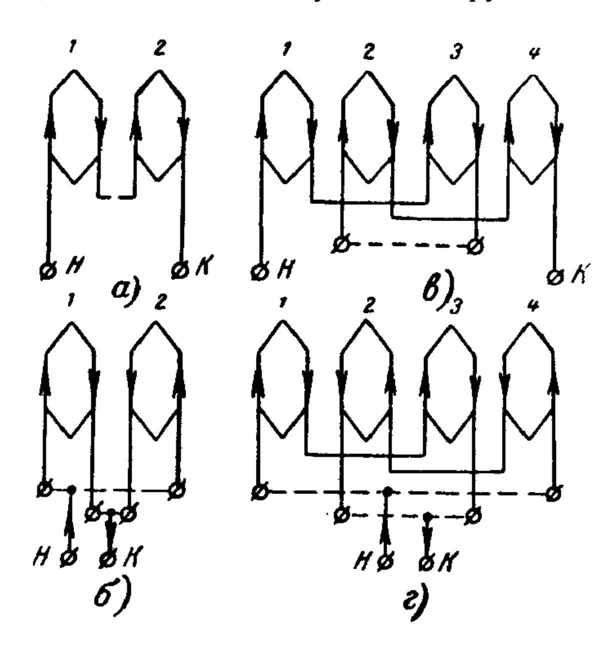


Рис. 69. Схема одной фазы двухскоростной обмотки.
а – на 4 полюса; *б* – на 2 полюса;
в – на 8 полюсов; *г* – на 4 полюса.

Изменяя направление тока в половине катушечных групп каждой фазы, получают вдвое меньшее число полюсов обмотки. На рис. 69, *а* приведена схема одной фазы двухскоростной обмотки при включении ее на 4 полюса, а на рис. 69, *б* – на 2 полюса. На рис. 69, *в* и *г* показана также одна фаза обмотки при включении ее на 8 полюсов и на 4 полюса. В каждой фазе (рис. 69) ток меняет свое направление столько раз, сколько получается полюсов в двухскоростной обмотке. Нетрудно также заметить, что число катушечных групп для получения двухскоростной обмотки должно быть равно меньшему числу полюсов. При другом числе катушечных групп в фазе двухскоростная обмотка с отношением чисел полюсов 1 : 2 не получится.

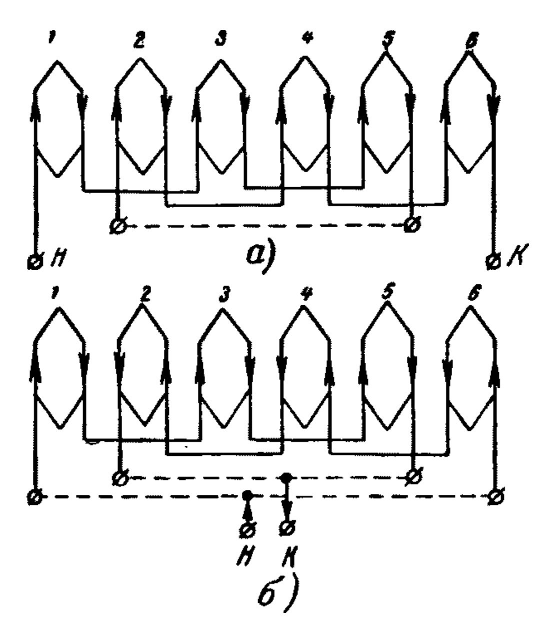


Рис. 70. Схема одной фазы двухскоростной обмотки.
а – на 12 полюсов;
б – на 6 полюсов.

На рис. 70 приведена схема одной фазы двухскоростной обмотки с шестью катушечными группами. Меньшее число полюсов такой обмотки будет 6, большее – 12, а скорости вращения 1000 и 500 *об. мин*. соответственно. Для получения в каждой фазе обмотки числа катушечных групп, равного меньшему числу полюсов, следует число пазов на полюс и фазу, а значит, и число катушек в катушечной группе q вычислять тоже по меньшему числу полюсов. Например, для многоскоростного электродвигателя с отношением скоростей вращения 1500/750 и полюсов 4/8 при Z = 36 число пазов на полюс и фазу q будет:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{4 \times 3} = 3$$

Поскольку многоскоростные электродвигатели обычно имеют двухслойную обмотку, то применительно к данному выше примеру число катушек будет равно в обмотке 36, а в фазе 12. Следовательно фаза будет иметь 12 : 3 = 4 катушечные группы, что соответствует меньшему числу полюсов. В общем случае обмотка будет иметь 3 × p катушечные группы, где p – большее число пар полюсов.

Шаг по пазам в двухскоростной обмотке принимается по большему числу полюсов, а для обмотки с меньшим числом полюсов шаг будет укороченным наполовину.

Расстояние между началом фаз двухскоростной обмотки определяют по меньшему числу полюсов, т. е. при вычислении ⅔ × τ полюсное деление т определяют для меньшего числа полюсов. Можно не вычислять ⅔ × τ, а принимать расстояние между началами фаз в схеме обмотки равным 2 × q.

В двухскоростных обмотках при отношении полюсов 8/4 и 12/6 расстояние между началами фаз принимают равным 4 × q, что не нарушает электрической симметрии обмотки. Таким образом, при конструировании двухскоростной обмотки с отношением чисел полюсов 1 : 2 число катушек в катушечной группе и полюсное деление τ для определения начала фаз вычисляют по меньшему числу полюсов, а шаг обмотки – по большему числу полюсов.

Каждая фаза двухскоростной обмотки должна иметь три вывода: начало, середину и конец. Изменение направления тока в одной половине каждой фазы достигается переносом питания из начала в середину фазы с помощью переключателя, который в первом случае соединяет фазы по схеме треугольник △, а во втором случае – по схеме две звезды YY.

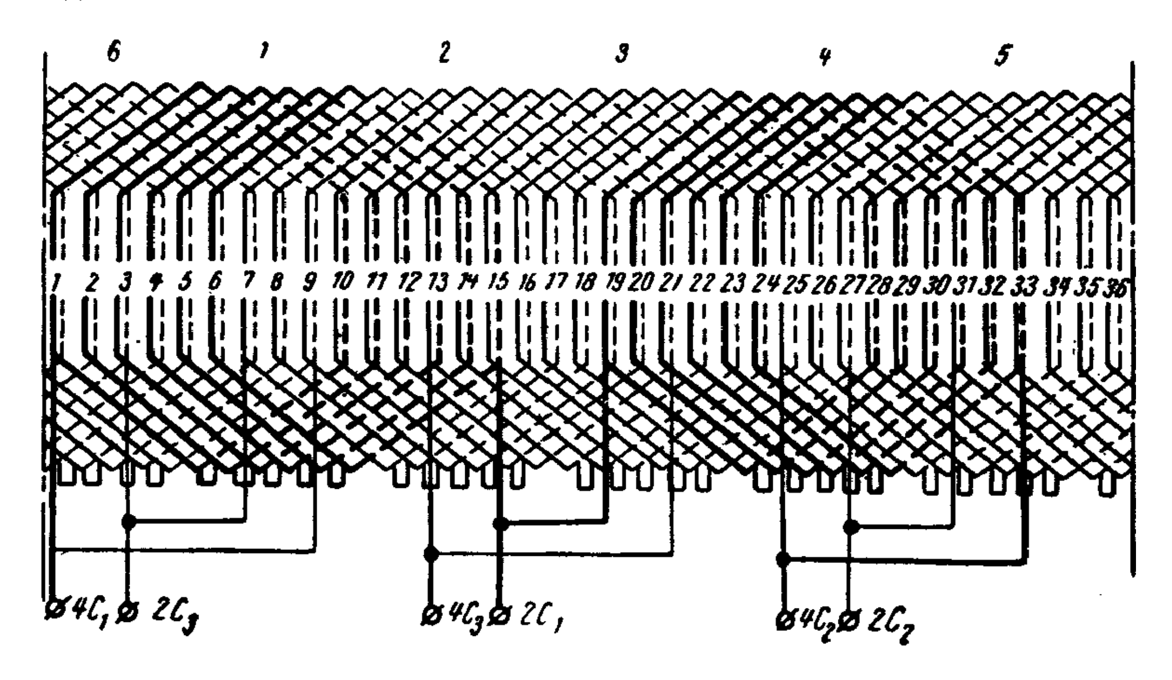


Рис. 71. Схема двухслойной двухскоростной секционной обмотки многоскоростного электродвигателя, Z = 36; $2p$ = 4/2; y = 1 – 10; соединение △/YY.

Каждая двухскоростная обмотка с отношением чисел полюсов 1 : 2 имеет всего шесть идущих к переключателю выводов, так как три вывода (по одному от каждой фазы) соединяются с тремя другими выводами внутри схемы обмотки, образуя соединение треугольник. Многоскоростной электродвигатель с отношением чисел полюсов 4 : 6 имеет также шесть идущих к переключателю выводов, по три от каждой обмотки, а остальные три вывода каждой обмотки соединены внутри схемы в звезду Y.

На рис. 71 приведена схема двухслойной двухскоростной секционной обмотки многоскоростного электродвигателя на 1500 и 3000 *об. мин*. Данные обмотки: $Z = 36$; $2p = 4/2$; $q = 6$; $y = 1 - 10$; соединение △/YY. Как и для всякой двухскоростной обмотки с отношением чисел полюсов 1 : 2, здесь число катушек в катушечной группе вычислено по меньшему числу полюсов:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{36}{2 \times 3} = 6$$

а шаг вычислен по большему числу полюсов: $y = Z : 2p = 36 : 4 = 9$. Катушечных групп в обмотке шесть, а в фазе две. Обмотка соединена внутри схемы в треугольник. Выводами из вершин треугольника являются концы с обозначениями: 4С1 4С2, 4С3, где буквами с цифровыми индексами С1, С2, С3 обозначены начала фаз обмотки, а цифра 4 показывает то число полюсов, которое получится при подключении этих выводов обмотки к сети трехфазного переменного тока. От середины каждой фазы обмотки отходит по выводу для получения высшей скорости. Выводы для получения меньшего числа полюсов и соответственно высшей скорости на схеме обозначены: 2С1, 2С2, 2С3, где цифра 2 – число полюсов, а обозначения С1, С2, С3 – начала фаз двойной звезды, при подключении которых к сети получится указанное на выводах число полюсов.

Начало 2–й фазы на схеме обмотки должно размещаться через $2 \times q = 2 \times 6 = 12$ пазов от начала 1–й фазы; на самом деле вывод, отходящий от 13–го паза, имеет обозначение 4С3, а отходящий от 25–го паза – 4С2. Здесь как бы нарушено правило построения схем обмоток. Однако перемена индексов начал двух фаз низшей или высшей скорости очень часто выполняется на схемах двухскоростных обмоток, чтобы обеспечить одинаковое направление вращения электродвигателя при последовательной нумерации зажимов на щитке или переключателе полюсов и согласованном подключении выводов к зажимам. В тех случаях, когда не изменено чередование фаз для одной из скоростей в самой обмотке, следует обеспечить переключение любых двух фаз питающей сети, т. е. поменять их местами, при переходе с одного числа полюсов на другое.

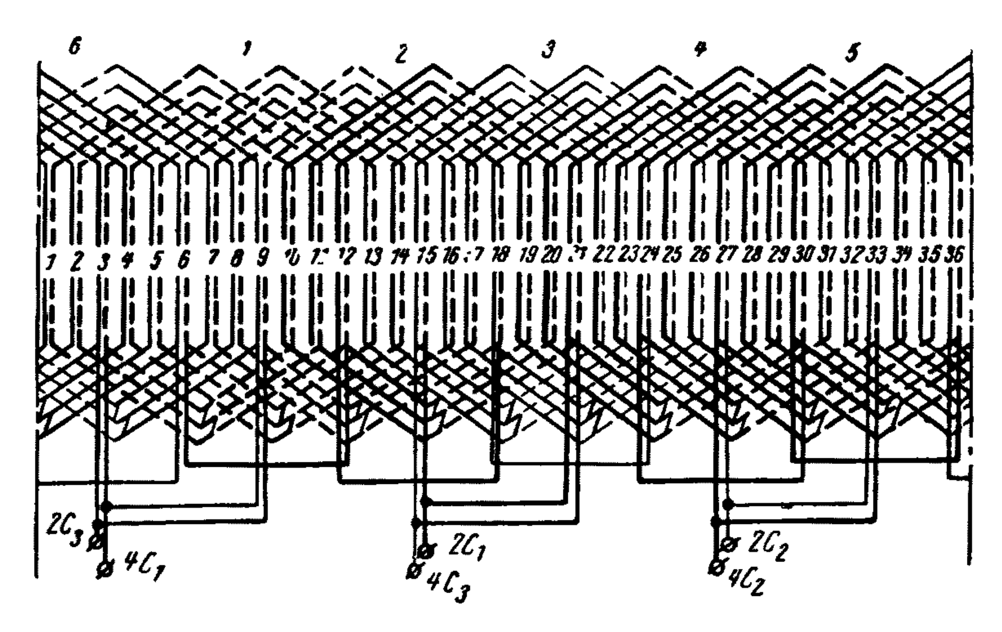


Рис. 72. Схема двухслойной двухскоростной катушечной (концентрической) обмотки многоскоростного электродвигателя, $Z = 36$; $2p = 4/2$; $q = 6$; $y = 1 - 10$; соединение △/YY.

На рис. 72 приведена схема двухслойной двухскоростной катушечной (концентрической) обмотки многоскоростного электродвигателя на 1500 и 3000 *об. мин*. Данные обмотки: Z = 36; 2p = 4/2; q = 6; y = 1 – 10; соединение △/YY.
Схема обмотки рис. 72 отличается от схемы обмотки рис. 71 только тем, что первая выполнена катушечной (концентрической) и, кроме того, каждая катушечная группа, состоящая из шести катушек, искусственно разбита на две катушечные полугруппы, которые укладываются в статоре рядом и соединяются последовательно (конец с началом). Катушечных групп в обмотке 6, в фазе – 2. Раздвоение катушечных групп в данной обмотке произведено в целях уменьшения длины лобовых частей.
Схема двухслойной двухскоростной обмотки многоскоростного электродвигателя на 750 и 1500 *об. мин*. приведена на рис. 73. Данные обмотки: Z = 54; 2p = 8/4; q = 4½; y = 1 – 8, соединение △/YY. Число пазов на полюс и фазу для данной обмотки получилось дробным: Z : 2p × m = 54 : 4 × 3 = 54 : 12 = 4½. Следовательно, катушечные группы с числом катушек 4 и 5 будут в каждой фазе чередоваться. На схеме обмотки (рис. 73) 1–я и 10–я катушечные группы 1–й фазы состоят из пяти катушек, а 4–я и 7–я – из четырех катушек. Шаг обмотки взят по большому числу полюсов:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{54}{8} = 6¾ \approx 7$$

Для получения низшей скорости (соединение △) от обмотки отходят выводы с обозначениями 8С1, 8С2, 8С3, а для высшей скорости (соединение YY) – выводы с обозначениями 4С1, 4С2, 4С3. На схеме обмотки индексы на выводах, обозначающие 2–ю и 3–ю фазу при четырех полюсах взаимно заменены – для изменения чередования фаз и получения в связи с этим одинакового направления вращения ротора двигателя при обеих скоростях. Расстояния между началами фаз взято 4 × q = 4 × 4½ = 18. Поэтому выводы 8С1 8С2 и 8С3 выходят из 1–го, 19–го и 37–го пазов. Схема двухслойной двухскоростной обмотки многоскоростного электродвигателя на 500 и 1000 об. мин приведена на рис. 74. Данные обмотки: Z = 54; 2p = 12/6; q = 3; y = 1 – 5; соединение △/YY.
Проверим правильность выбора основных данных этой обмотки.
Число катушек в катушечной группе:

$$q = \frac{Z}{2p \times m} = \frac{54}{6 \times 3} = 3$$

Шаг по пазам:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{54}{12} = 4½$$

на схеме обмотки шаг взят 4, т. е. с укорочением на ½ паза.
Полюсное деление:

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{54}{6} = 9 \qquad ⅔ \times \tau = ⅔ \times 9 = 6$$

На схеме обмотки расстояние между началами фаз взято 12 пазов, т. е. удвоенное (4 × q).
В соответствии с этим выводы для включения на 12 полюсов выходят из 1–го, 13–го и 25–го пазов, а для включения на шесть полюсов выводы выходят из 46–го, 4–го и 16–го пазов и обозначены 6С2, 6С3 и 6С2; здесь произведена взаимная замена индексов в обозначениях 2–й и 3–й фаз.
Вся обмотка состоит из 18 катушечных групп; на каждую фазу приходится шесть катушечных групп; число катушечных групп в фазе, равно меньшему числу полюсов.
Следовательно, обмотка (рис. 74) составлена правильно.

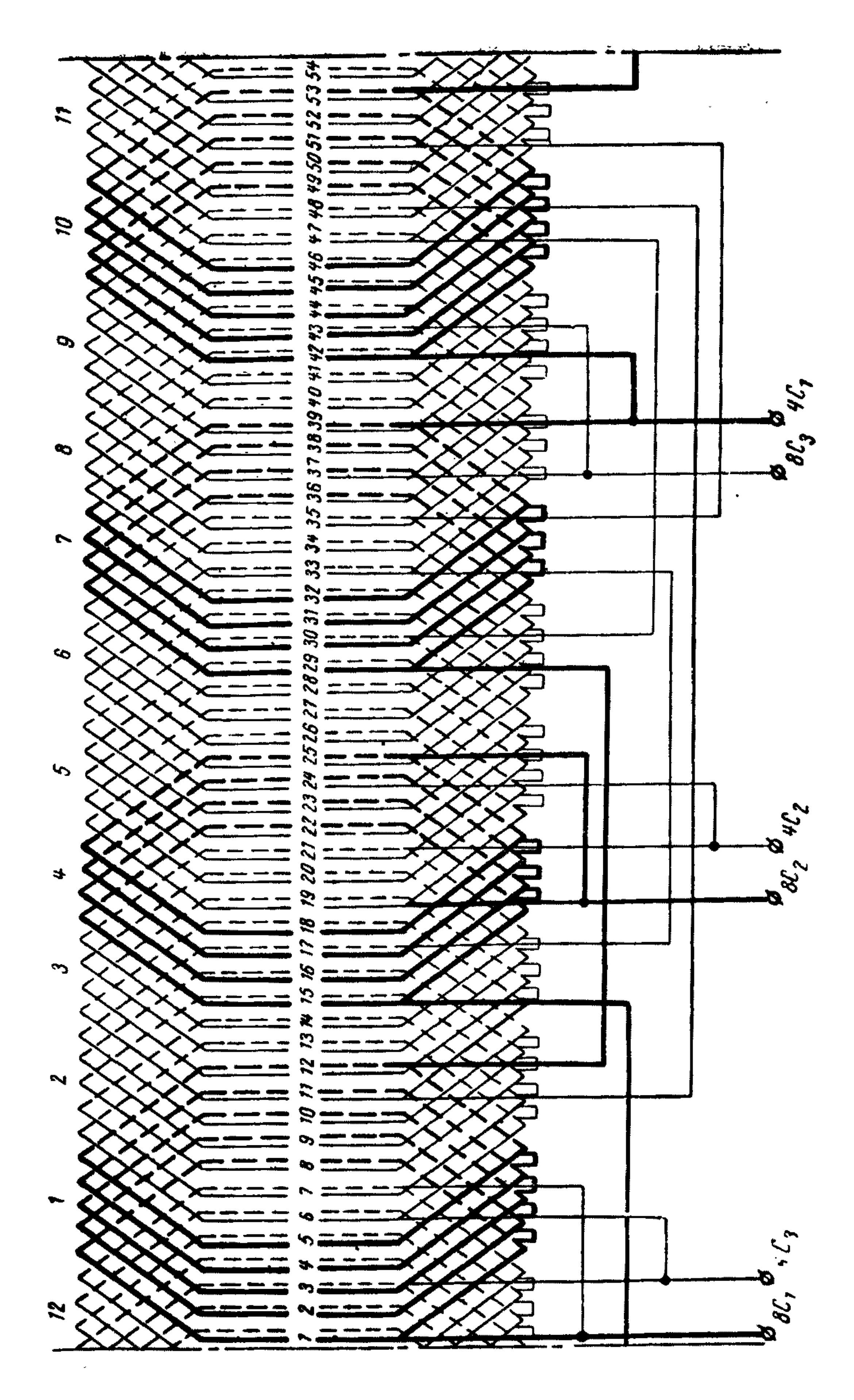


Рис. 73. Схема двухслойной двухскоростной обмотки многоскоростного электродвигателя, $Z = 54$; $2p = 8/4$; $y = 1 - 8$; соединение $\triangle$/YY.

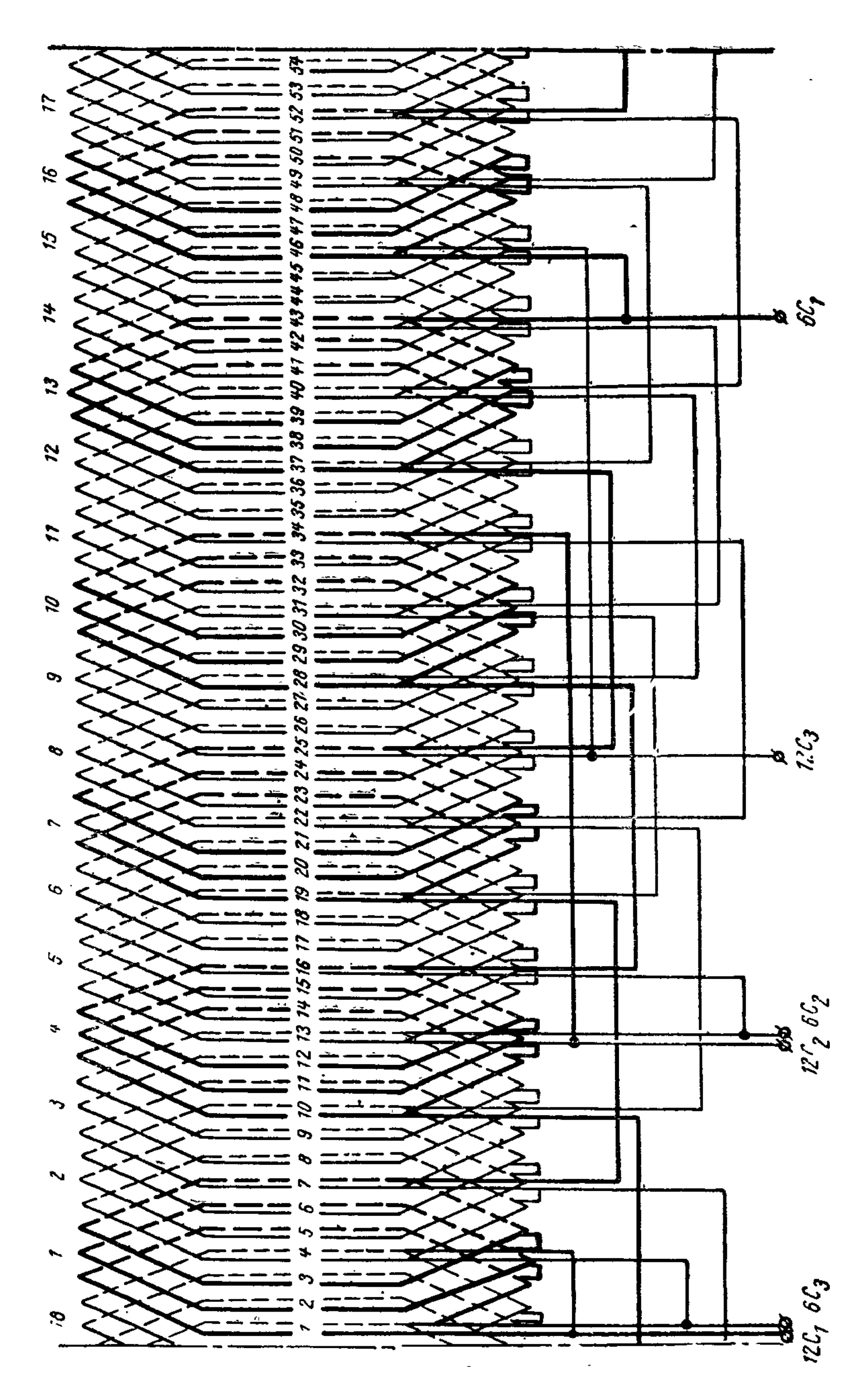
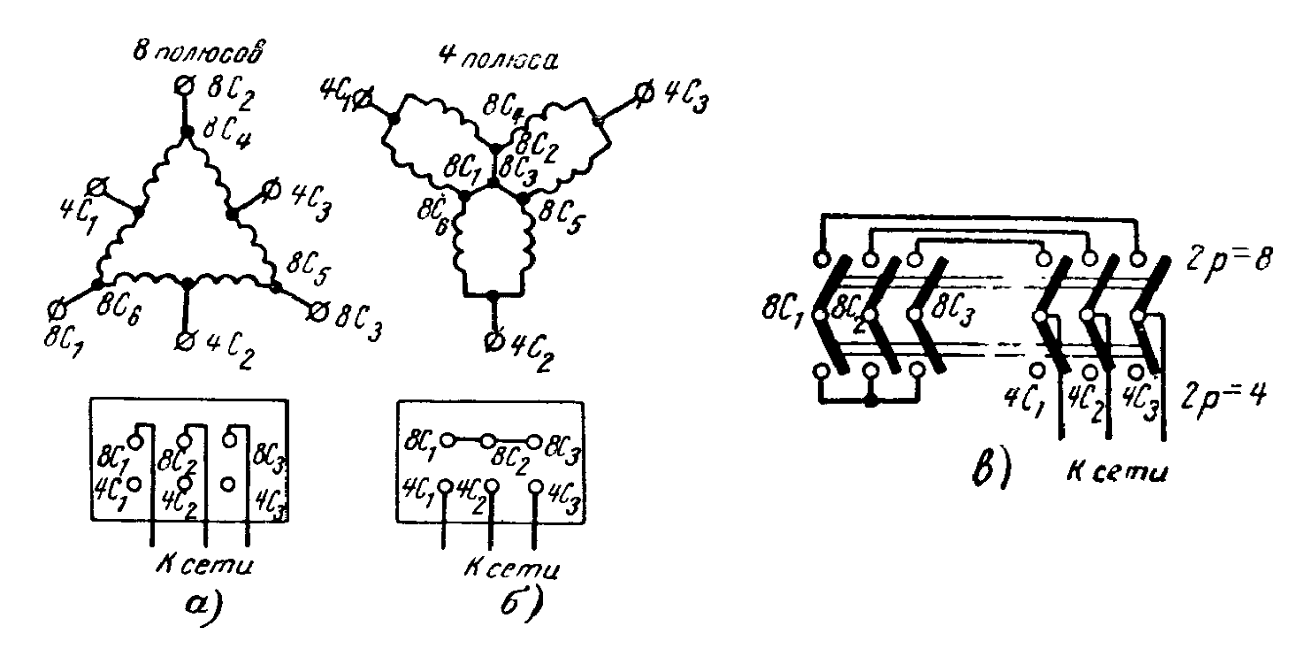


Рис. 74. Схема двухслойной двухскоростной обмотки многоскоростного электродвигателя, $Z = 54$; $2p = 12/6$; $y = 1 - 5$; соединение △/YY.

16. Схемы включения многоскоростных электродвигателей единых серий А, АО и А2, АО2.

В §15 указаны все варианты исполнения по числу полюсов многоскоростных электродвигателей единых серий. Наиболее простая схема включения требуется для электродвигателя с двумя скоростями вращения при 2*p* = 6/4. Обе обмотки такого электродвигателя являются независимыми и имеют по три вывода, так как остальные три вывода каждой обмотки соединены внутри схемы в звезду. Для переключения числа полюсов многоскоростного электродвигателя при 2*p* = 16/4 можно воспользоваться простым переключателем или даже перекидным рубильником.

Электродвигатели с двумя скоростями и отношением чисел полюсов 1 : 2 также имеют шесть выводов, однако схема включения таких электродвигателей усложняется тем, что при переключении на меньшее число полюсов требуется не только перенести питание на другие три вывода, но и соединить вместе в общую нулевую точку три вершины треугольника для получения двойной звезды, т. е. звезды с двумя параллельными ветвями.



а – схема соединения фаз и включения их на щитке в треугольник при 8 полюсах;
б – схема соединения фаз и включения их на щитке двойной звездой при 4 полюсах;
в – схема переключения двухскоростной обмотки (с 8 полюсов на 4 полюса) с помощью переключателя.

На рис. 75, *а* сверху приведена схема соединения фаз обмотки в треугольник при восьми полюсах, а ниже показаны расположение зажимов на щитке и подвод питания от сети. Выводы, идущие от середин фаз (для получения меньшего числа полюсов) с обозначениями 4С3 и 4С2, имеют взаимно переставленные индексы для осуществления одинакового направления вращения при разных скоростях и числах полюсов.

На рис. 75, *б* сверху приведена схема соединения фаз обмотки в двойную звезду при четырех полюсах, а ниже показаны расположение зажимов на щитке, подвод питания от сети и соединение в нулевую точку вершин треугольника для получения двойной звезды. Для переключения чисел полюсов двухскоростной обмотки в отношении 1 : 2 в двухскоростных электродвигателях может быть применен переключатель, схема которого показана на рис. 75, *в*.

Трехскоростные электродвигатели имеют 9 выводов: 6 – от двухскоростной и 3 – от обычной обмотки, соединенной в звезду, а четырехскоростные электродвигатели имеют по 12 выводов (по 6 от двух двухскоростных обмоток).

Поэтому переключение числа полюсов в трех– и четырехскоростных электродвигателях должно выполняться с помощью более сложных переключателей или аппаратов контакторного управления.
В многоскоростных электродвигателях с двумя обмотками в статоре при работе включается только одна обмотка. Если не включенная обмотка соединена в треугольник (например в трехскоростном двигателе при работе со скоростью вращения 1000 *об. мин.* и четырехскоростном при работе с любой скоростью вращения), то в цепи неработающей обмотки будет наводиться *эдс* от вращающегося магнитного поля работающей обмотки и будет проходить ток, создавая дополнительные потери и нагрев двигателя. Чтобы устранить это явление, в некоторых схемах предусматривается размыкание цепи треугольника не работающей обмотки при работе многоскоростного электродвигателя.

Глава седьмая
Обмотки ротора асинхронного электродвигателя.
17. Виды обмоток ротора.

В зависимости от конструкции обмотки ротора делятся на короткозамкнутые и фазные.
Короткозамкнутые обмотки выполняются путем заливки пазов сердечника ротора алюминием с образованием короткозамкнутых колец и вентиляционных крыльев или укладкой в пазы медных, иногда латунных стержней, которые затем свариваются с медными короткозамыкающими кольцами.
Фазные обмотки ротора бывают двух видов: однослойные катушечные (концентрические) и двухслойные стержневые (волновые).
Катушечные (концентрические) обмотки ротора ничем не отличаются от катушечных (концентрических) обмоток статора, приведенных на рис. 37 и 45. Как правило, три выводных конца обмотки соединяют в звезду внутри схемы (начала или концы фаз), а другие три вывода выводят к контактным кольцам. В зависимости от величины шлица паза катушечные (концентрические) обмотки выполняют всыпными или впротяжку. Обычно стержневые волновые обмотки применяются в более мощных электродвигателях.
Элементом стержневой обмотки является стержень, который занимает половину паза. Общее количество эффективных стержней в обмотке равно $Z \times 2$; эффективный стержень может состоять из двух или нескольких элементарных стержней, которые соединяются с другим эффективным стержнем в лобовой части обмотки.
Стержневые обмотки встречаются с четырьмя, шестью или восемью стержнями (эффективными) в пазу и тоже считаются двухстержневыми обмотками. При составлении таких схем считается, что роторы имеют удвоенное, утроенное или учетверенное число пазов; вычертив такое количество пазов, обмотку размещают так же, как обычную двухстержневую.

18. Составление схем обмоток ротора.

Исходными данными для составления схемы стержневых волновых обмоток являются: число пазов ротора Z_2, число полюсов $2p$ и число параллельных ветвей в обмотке ротора a. Шаг волновой обмотки определяется так же, как и в петлевых и равен числу пазов разделенному на число полюсов. В противоположность петлевым обмоткам, где укорочение шага обмотки дает экономию меди, в волновых обмотках укорочение шага на расход меди не влияет, так как укорочение с одной стороны ротора влечет за собой удлинение шага обмотки с противоположной стороны. Поэтому волновые обмотки ротора выполняются с диаметральным шагом, за исключением переходов при каждом обходе обмотки, выполняемых с укороченным или удлиненным шагом.

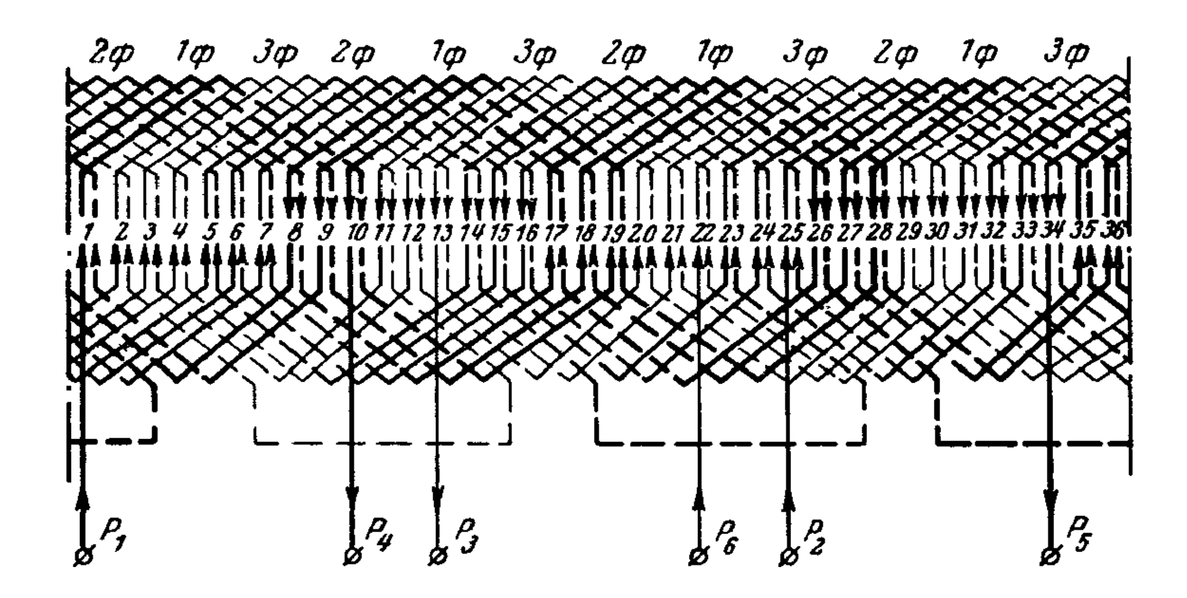


Рис. 76. Схема стержневой волновой обмотан ротора с укороченными переходами. Z = 36; $2p$ = 4; q = 3; yп = 9; yп.ук = 9; y_3 = 9.

На рис. 76 приведена схема стержневой волновой обмотки с укороченными переходами. Так как диаметральный шаг этой обмотки:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{4} = 9$$

то с задней стороны ротора и передней стороны его при обычном ходе волны шаг диаметральный, а на переходах укороченный.

Расположение стержней в пазах и соединение их в лобовой части по ходу волны следующее: начало 1–й фазы занимает верхнюю часть 1–го паза, вторая сторона катушки (секции) – нижнюю часть 10–го паза. Стержень, являющийся полукатушкой, расположенной в 1–м пазу, с задней стороны ротора соединен со стержнем, расположенным в нижней части 10–го паза, который в свою очередь с передней стороны ротора соединен со стержнем верхней части 19–го паза. Из 19–го паза, двигаясь по ходу волны, стержень попадает в нижнюю часть 28–го паза, а из 28–го паза, следуя по диаметральному шагу, он должен войти в верхнюю часть 1–го паза, так как 28 + 9 = 37, а Z = 36. Но 1–й паз уже занят началом 1–й фазы, поэтому делается переход ко второй волне, для чего применяется укороченный шаг с передней стороны ротора yп.ук = 8 (1 – 9), и следующий по ходу стержень будет уже расположен на один паз ближе и займет верхнюю часть 36–го паза. Соединив этот стержень со стержнем, расположенным в 28–м пазу, и двигаясь дальше по ходу волны, попадают в 9–й, 18–й и 27–й пазы, откуда должны попасть в 36–й паз, но он уже занят, поэтому снова применяют укороченный шаг на один паз, расположив стержень в 35–м пазу, и начинают 3–й обход обмотки, перемещаясь из 35–го паза в 8–й, из 8–го – в 17–й, а из 17–го – в 26–й паз.

Если далее продолжать движение в принятом направлении, то при укороченном шаге попали бы в 34–й паз, а при следующем обходе – в 33–й и т. д. Таким образом, после трех обходов обмотки получены только две катушечные группы, где каждая состоит из трех катушек, т. е. получены один слой обмотки и две катушечные группы вместо четырех.

Для получения двухслойной обмотки и недостающих двух катушечных групп изменяют направление обходов на обратное. Если обход обмотки был начат против часовой стрелки, то теперь его продолжают по часовой стрелке. В местах изменения направления обхода ставят перемычки, так как стержень, с которым он должен быть соединен, расположен на некотором расстоянии от него.

Таким образом, продолжают движение по волне из нижней части 35–то паза в верхнюю часть 26–го, из 26–го – в нижнюю часть 17–го, из 17–го – в верхнюю часть 8–го паза, откуда должны были попасть в нижнюю часть 35–го паза, который занят, поэтому здесь опять шаг укорачивается на один паз и новый обход начинают из нижней части 36–го паза в верхнюю часть 27–го паза, из 27–го – в нижнюю часть 18–го, из 18–го – в верхнюю часть 9–го, а из 9–го должны были попасть в 36–й паз, но он тоже занят, поэтому снова применяют укорочение шага, расположив стержень в 1–м пазу, и дальше продолжают движение в верхнюю часть 28–го, из 28–го – в нижнюю часть 19–го паза, из 19–го – в верхнюю часть 10–го паза, где и заканчивается третий и последний обход; этот стержень будет служить концом 1–й фазы. Аналогично укладываются остальные фазы после предварительного определения пазов, в которых разместятся начала фаз и перемычки; концы фаз определяются после размещения их обмоток.

Очень важно начала и концы фаз обмоток ротора и перемычки разместить симметрично по окружности во избежание небаланса, который приводит к вибрации ротора. Поэтому начала фаз лучше расположить на расстоянии 120 геометрических град. друг от друга при сохранении электрической симметрии. Это условие может быть выполнено при расположении начал фаз друг относительно друга на 120 или 240 эл. град. плюс любое целое число, помноженное на 360 эл. град. При симметричном расположении по окружности ротора начал фаз концы фаз и перемычки также симметрично разместятся. В обмотке рис. 76 начала фаз расположены в 1–м, 25–м и 13–м пазах, что соответствует 480 эл. град между фазами. Вычтя из 480 эл. град. 360, получим 120 эл. град., следовательно, кроме геометрической, здесь выдержана и электрическая симметрия. Однако не все обмотки ротора можно выполнить с симметричным расположением начал, концов фаз и перемычек. При числе пар полюсов, кратном 3, выводы фаз и перемычки несимметрично расположатся по окружности и в этих случаях потребуется балансировка ротора.

Составляя схему обмотки ротора, целесообразно обозначить цифрами номера фаз, а стрелками – направление токов и проверить правильность чередования полярности полюсов. Выводные концы обмотки должны обозначаться согласно ГОСТ: начало 1–й фазы – Р1, начало 2–й фазы – Р2, начало 3–й фазы – Р3, конец 1–й фазы – Р4, конец 2–й фазы – Р5, конец 3–й фазы – Р6.

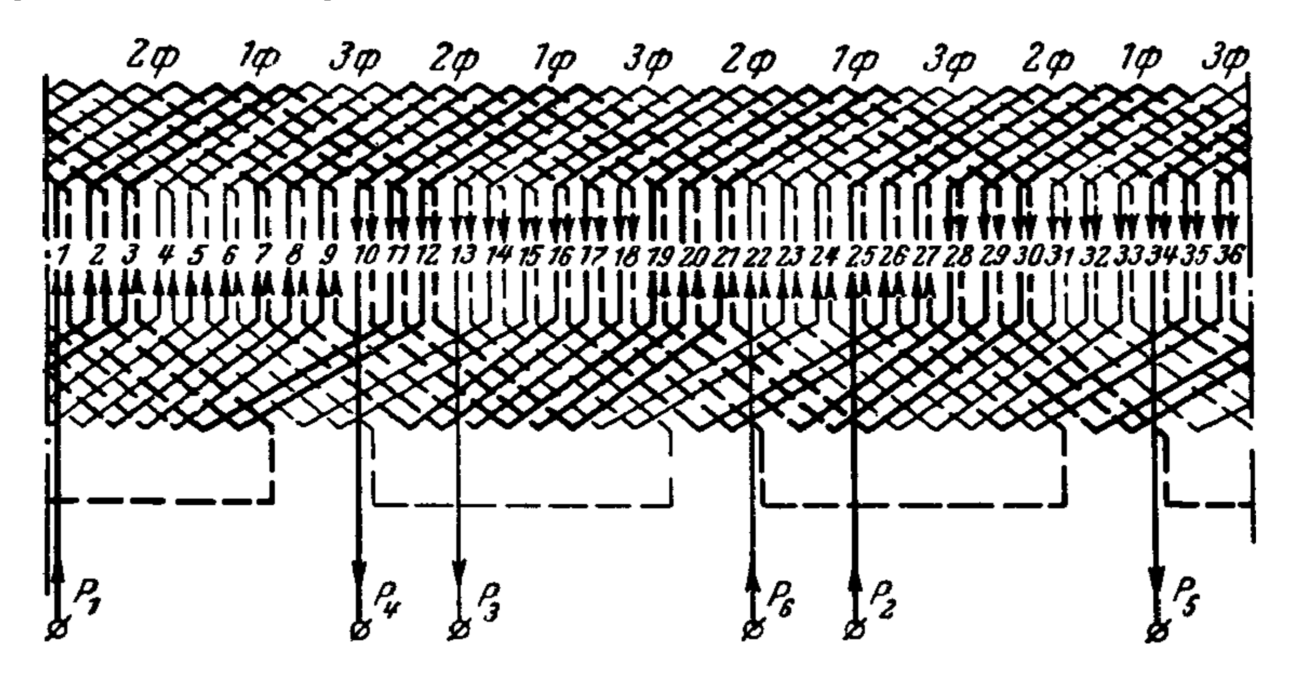


Рис. 77. Схема стержневой волновой обмотки ротора с удлиненными переходами.
$Z = 36$; $2p = 4$; $q = 3$; $y_п = 9$; $y_{п.уд} = 10$; $y_з = 9$.

На рис. 77 приведена схема стержневой волновой обмотки с данными, как по схеме рис. 76. Разница между этими схемами заключается лишь в том, что на рис. 77 выполнена схема с удлиненными переходами, а перемычки сдвинуты на четыре паза с сохранением симметрии. Составление схем стержневых волновых обмоток ротора более сложно, чем составление схем обмоток статора, поэтому при составлении схем обмоток ротора рекомендуется пользоваться таблицами по составлению схем роторных обмоток, составленных отдельно для обмоток с укороченными и отдельно с удлиненными переходами, при различном числе полюсов, пазов, шага обмотки (передний и задний), а также расположения начал и концов фаз и перемычек.

Приложение 10. Чередование катушечных групп при дробных числах пазов на полюс и фазу $q = b + c/d$

число пазов на полюс и фазу q	чередование катушечных групп
$1^1/_2$	(1 – 2), (1 – 2) …
$1^1/_4$	(1 – 1 – 1 – 2), (1 – 1 – 1 – 2) …
$1^3/_4$	(1 – 2 – 2 – 2), (1 – 2 – 2 – 2) …
$1^1/_5$	(1 – 1 – 1 – 1 – 2), (1 – 1 – 1 – 1 – 2) …
$1^2/_5$	(2 – 1 – 2 – 1 – 1), (2 – 1 – 2 – 1 – 1) …
$1^3/_5$	(1 – 2 – 1 – 2 – 2), (1 – 2 – 1 – 2 – 2) …
$1^4/_5$	(1 – 2 – 2 – 2 – 2), (1 – 2 – 2 – 2 – 2) …
$1^1/_7$	(1 – 1 – 1 – 1 – 1 – 1 – 2), (1 – 1 – 1 – 1 – 1 – 1 – 2) …
$1^2/_7$	(1 – 2 – 1 – 1 – 1 – 2 – 1), (1 – 2 – 1 – 1 – 1 – 2 – 1) …
$1^3/_7$	(1 – 2 – 1 – 2 – 1 – 2 – 1), (1 – 2 – 1 – 2 – 1 – 2 – 1) …
$1^4/_7$	(2 – 1 – 2 – 1 – 2 – 1 – 2), (2 – 1 – 2 – 1 – 2 – 1 – 2) …
$1^5/_7$	(2 – 1 – 2 – 2 – 2 – 1 – 2), (2 – 1 – 2 – 2 – 2 – 1 – 2) …
$1^6/_7$	(1 – 2 – 1 – 1 – 1 – 2 – 1), (1 – 2 – 1 – 1 – 1 – 2 – 1) …
$2^1/_2$	(2 – 3), (2 – 3) …
$2^1/_4$	(2 – 2 – 2 – 3), (2 – 2 – 2 – 3) …
$3^1/_4$	(3 – 3 – 3 – 4), (3 – 3 – 3 – 4) …
$4^1/_5$	(4 – 4 – 4 – 4 – 5), (4 – 4 – 4 – 4 – 5) …

Глава восьмая. Сокращенный расчет обмотки статора асинхронного трехфазного электродвигателя. Расчет обмотки ротора.

19. Предварительные сведения.

Расчет обмоток электродвигателей сводится к определению необходимого количества эффективных проводов в пазе и сечения обмоточного провода. При расчете обмоток следует стремиться к тому, чтобы, не выходя из допустимых для данного типа электродвигателей магнитных и электрических нагрузок, полностью использовать заложенные в электродвигателе активные материалы – электротехническую сталь и обмоточную медь или алюминий. Электродвигатели старых серий в большинстве случаев имеют заниженные магнитные и электрические нагрузки, что при пересчете иногда дает возможность несколько увеличить мощность. Кроме того, применение обмоточных проводов с более тонкой и теплостойкой изоляцией и изоляционных материалов с более высокой нагревостойкостью также дает возможность увеличить мощность электродвигателя, а в отдельных случаях – и произвести замену медных обмоточных проводов алюминиевыми с возможным сохранением прежней мощности. Вопрос замены медных обмоточных проводов алюминиевыми при сохранении номинальной мощности имеет большое народнохозяйственное значение, поэтому этот вариант не должен упускаться. При пересчете следует учитывать, что увлечение большими магнитными и электрическими нагрузками в активных частях электродвигателя недопустимо, так как это ведет к чрезмерному нагреву электродвигателя и резкому сокращению срока службы его.
О величине магнитной и электрической нагрузки электродвигателя судят по величине магнитной индукции в воздушном зазоре и плотности тока в проводах обмотки. Магнитная индукция в воздушном зазоре и плотность тока в обмотке различных типов электродвигателей различны по величине и колеблются в больших пределах. Есть, например, электродвигатели с максимальными магнитными индукциями в воздушном зазоре, равными 3500 *гс*, и электродвигатели с индукциями, равными 8000 – 9000 *гс*. Также встречаются электродвигатели с плотностью тока в обмотке статора, равной 2,1 *ампер* на 1 *мм*² и 8,7 *А*/*мм*². Поэтому правильный выбор максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и плотности тока в проводах обмотки представляет основную трудность при расчетах и пересчетах обмоток.
Магнитный поток, а значит, и величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре зависят от числа эффективных витков в фазе, что видно из формулы:

$$E\text{ф}_1 = 4{,}44 \times kw_1 \times w_1 \times f \times \Phi \times 10^{-8} \quad \text{вольт} \quad (12)$$

где: $E\text{ф}_1$ – *эдс* фазы обмотки статора, *в*; kw_1– обмоточный коэффициент, учитывающий укорочение шага обмотки статора и число катушек в катушечной группе; w_1 – число эффективных витков в фазе обмотки статора; f – частота переменного тока, *гц*. Ф – магнитный поток, *максвел*.

Так как падение напряжения в статоре электродвигателя незначительно, *эдс* $E\text{ф}_1$ можно приравнять к напряжению $U\text{ф}_1$ и для удобства анализа формулу (12) представить в следующем виде:

$$\Phi = \frac{U\text{ф}_1 \times 10^{8}}{4{,}44 \times kw_1 \times w_1} \quad \text{мкс} \quad (13)$$

Из уравнения (13) видно, что при неизменных напряжении и частоте сети магнитный поток обратно пропорционален числу эффективных витков в фазе обмотки.

Если число эффективных витков в фазе уменьшить, например, в 1,1 раза, то магнитный поток увеличится в 1,1 раза. Последствия от увеличения магнитного потока в 1,1 раза можно найти, анализируя приведенную ниже формулу, выражающую основной закон магнитной цепи:

$$\Phi = \frac{\text{мдс}}{R_m} = \frac{m_1 \times kw_1 \times w_1 \times I\mu}{R_m} \quad (14)$$

где: *мдс* – магнитодвижущая сила; R_m – магнитное сопротивление цепи магнитопровода; m_1– число фаз переменного тока обмотки статора; kw_1 – обмоточный коэффициент; w_1 – число эффективных витков в фазе обмотки статора; $I\mu$ –намагничивающий ток, *а*.

Если мы будем считать сопротивление магнитной цепи R_m постоянной величиной для данного электродвигателя, то переменными величинами в правой части формулы (14) являются эффективные витки фазы и намагничивающий ток $I\mu$, т. е. переменной величиной является произведение $I\mu \times w_1$ иначе говоря, намагничивающая сила холостого хода. Увеличение магнитного потока в 1,1 раза вызывает и увеличение намагничивающей силы холостого хода в 1,1 раза. Так как причиной увеличения магнитного потока в 1,1 раза явилось уменьшение числа эффективных витков в фазе обмотки статора w_1 в 1,1 раза, то, следовательно, для того чтобы намагничивающая сила холостого хода увеличились в 1,1 раза, намагничивающий ток должен возрасти в 1,1 × 1,1 = 1,21 раза, то есть в $1{,}1^2$.

Таким образом, уменьшение эффективных витков в фазе обмотки статора вызывает увеличение магнитного потока в первой степени, а намагничивающего тока – в квадрате и, наоборот, увеличение числа эффективных витков в фазе обмотки статора вызывает уменьшение магнитного потока в первой степени, а намагничивающего тока – в квадрате.

Если при расчетах обмоток электрических машин незначительно отклоняться от расчетного числа эффективных витков в фазе, обусловленного нормальными магнитными нагрузками, то квадратичная зависимость между магнитным потоком (магнитной индукцией) и намагничивающим током будет соответствовать действительности, а при значительных отклонениях зависимость уже будет иной. Как известно, электротехническая сталь, применяемая для сердечников статоров и роторов электродвигателей, способна намагничиваться и изменять магнитную проницаемость; при этом насыщенная сталь резко уменьшает магнитную проницаемость. Уменьшение магнитной проницаемости активной стали вызывает увеличение магнитного сопротивления цепи магнитопровода в целом, что вызывает в свою очередь и рост намагничивающей силы холостого хода, т. е. и намагничивающего тока. Следовательно, значительное уменьшение эффективных витков в фазе обмотки статора против расчетных вызывает увеличение намагничивающего тока из–за роста магнитного потока (магнитной индукции) и магнитного сопротивления цепи магнитопровода (см. формулу 14).

Ниже приведены данные изменения тока холостого хода в зависимости от изменения числа эффективных проводов в фазе обмотки статора электродвигателя типа А62–6 мощностью 10 *квт*, напряжением 220/380 *в*, 37/21,5 *а*, 1000 *об. мин.* производства Ярославского электромеханического завода. Напряжение во время опыта поддерживалось постоянным (380 *в*), а изменению подвергались числа эффективных проводов в фазе обмотки статора, что вызывало соответствующие изменения величины магнитного потока (магнитной индукции) и тока холостого хода. Так как ток холостого хода трехфазного электродвигателя по величине мало отличается от намагничивающего тока:

$$I\text{хх} = (1{,}01 - 1{,}05) \times I\mu,$$

выводы из проведенного опыта можно отнести и к намагничивающему току.

Данные опыта подтвердили, что при увеличении максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре в 1,5 раза ток холостого хода увеличился не в 2,25 раза, как было бы при квадратичной зависимости, а в 6,25 раза; при увеличении магнитной индукции в 1,73 раза ток холостого хода увеличился в 12,5 раза; при увеличении магнитной индукции в 2 раза ток холостого хода увеличился в 28,8 раза, превысив номинальный ток в 10,7 раза. При уменьшении магнитной индукции в 1,5 раза ток холостого хода уменьшился в 2,7 раза; при уменьшении магнитной индукции в 2 раза ток холостого хода уменьшился в 6,66 раза; при уменьшении магнитной индукции в 3 раза ток холостого хода уменьшился в 13,34 раза. Более интенсивно изменяется ток холостого хода при увеличении магнитной индукции против расчетной, так как здесь сказывается влияние магнитного насыщения стали.

Влияние изменения числа эффективных проводов на параметры электродвигателя.

При уменьшении числа эффективных проводов в пазе против расчетного уменьшается и коэффициент мощности ($cos\varphi$), так как при этом увеличивается реактивная составляющая потребляемого из сети тока на намагничивание магнитопровода; также уменьшается и *кпд* электродвигателя из–за возрастания потерь в активной стали. Наряду с этим увеличиваются пусковой и максимальный моменты вращения, что является положительным моментом. При значительном снижении числа эффективных проводов против расчетного ток холостого хода и нагрев активных частей электродвигателя резко возрастают.

При увеличении числа эффективных проводов в пазе статора против расчетного cosφ увеличивается, но *кпд*, пусковой и максимальный моменты вращения уменьшаются. При значительном увеличении числа эффективных проводов в пазе (за счет уменьшения сечения провода) потери на нагрев обмотки значительно возрастают и резко снижается мощность электродвигателя.

Вторым, не менее важным вопросом при расчетах обмоток электродвигателей является выбор сечения обмоточных проводов обмотки. Сечение обмоточных проводов выбирают, исходя из допустимой плотности тока, качества изоляционных материалов, изоляции обмоточного провода и условий, в которых работает двигатель. Заниженная плотность тока ведет к недоиспользованию обмоточных материалов и занижению мощности электродвигателя, а чрезмерная плотность тока влечет за собой чрезмерный нагрев и сокращение срока службы электродвигателя. Между тем применение проводов с более нагревостойкой изоляцией позволяет увеличить плотность тока в проводах, повысить мощность электродвигателя или продолжительность его безаварийной работы. Улучшение условий охлаждения дает возможность повысить плотность тока в обмотке, а иногда и увеличить мощность электродвигателя.

При выборе плотности тока следует руководствоваться данными заводов–изготовителей для подобных типов электродвигателей, если при этом характер изоляции и марка проводов не меняются. При правильном выборе числа эффективных проводов в пазе статора и их сечения степень заполнения паза статора будет нормальной.

В технической литературе по ремонту электродвигателей и расчету обмоток нет единого метода для определения величины коэффициента заполнения паза. Одни авторы коэффициентом заполнения паза считают отношение площади всех изолированных проводов в пазе ко всей площади паза, другие – отношение площади всех изолированных проводов в пазе к площади паза за вычетом клина и пазовой изоляции. Второй метод определения коэффициента заполнения паза точнее, особенно для узких пазов. Первый метод менее точен, но проще и практичнее.

Иногда пользуются условным значением коэффициента заполнения паза, вычисляемым по формуле:

$$k_{П} = \frac{N \times d_{ИЗ}^2}{S_{ПИЗ}}$$

где: N – число проводов в пазе; $d_{ИЗ}$ – диаметр провода с изоляцией; $S_{ПИЗ}$ – площадь паза за вычетом пазовой изоляции и клина. Подсчитанный по этой формуле коэффициент заполнения паза не должен превышать 0,75. При исчислении коэффициента заполнения паза по первому методу можно пользоваться следующими числовыми значениями:

а) для трапециевидных пазов:

при однослойной обмотке: $k_{П} = 0{,}37 \div 0{,}45$

при двухслойной обмотке: $k_{П} = 0{,}35 \div 0{,}42$

б) для овальных пазов

при однослойной обмотке: $k_{П} = 0{,}42 \div 0{,}55$

при двухслойной обмотке: $k_{П} = 0{,}37 \div 0{,}45$

Меньшее значение коэффициента заполнения паза принимают для двигателей меньшей мощности.

Замена одного провода двумя или несколькими эквивалентного сечения.

При выполнении обмотки статора часто наряду с параллельными ветвями приходится применять и параллельные провода. Замена одного провода двумя или несколькими параллельными проводами одинакового сечения производится довольно часто. Замена же одного провода двумя или несколькими параллельными проводами разных сечений встречается реже; о допустимости такой замены имеются разные мнения. Однако многочисленные опыты подтверждают, что при том числе витков, которое имеется в обмотках электродвигателей, токи в параллельных проводах практически распределяются пропорционально сечениям проводов и обратно пропорционально их активным сопротивлениям, что позволяет производить замену одного провода двумя или несколькими проводами разного сечения. Однако больше трех параллельных проводов применять не рекомендуется, так как при этом снижается коэффициент заполнения паза за счет дополнительной изоляции проводов н воздушных прослоек между проводами. В приложении приведены варианты замены одного круглого провода двумя проводами, эквивалентными по их суммарному сечению.

20. Расчет обмотки статора.

Много методов и способов приближенных и сокращенных расчетов обмоток электродвигателей существует и применяется при пересчете электрических двигателей, однако не все они достаточно точны при определении расчетных параметров. Одним из наиболее простых и достаточно точных методов расчета статорных обмоток электродвигателей мощностью до 100 *квт* является изложенный ниже. Для определения числа эффективных проводов в пазе статора в основу расчета берется приближенная формула:

$$N_{П} = \frac{2{,}6 \times U ф \times p \times 10^6}{D_B \times L \times Z \times B_B} \quad (15)$$

где: $Uф$ – фазное напряжение, *в*; p – число пар полюсов; D_B – внутренний диаметр статора (диаметр расточки), *см.*, L – длина активной стали статора без вентиляционных каналов, *см.*; Z – число пазов статора; B_B – максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*; 2,6 – коэффициент, учитывающий частоту f = 50 *гц* и другие постоянные или принятые постоянными величины.

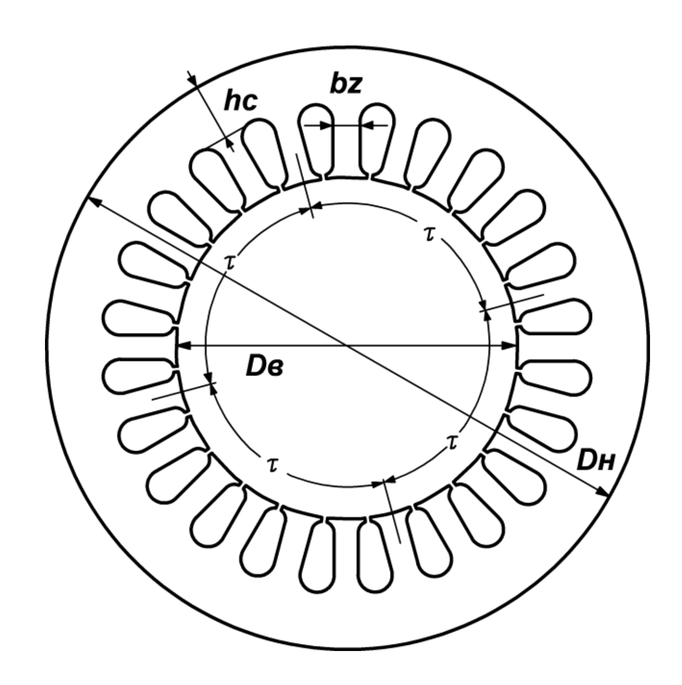


Рис. 32. Пластина пакета статора с основными размерами и полюсными делениями, D_B – диаметр внутренний, D_H – диаметр наружный, hc – спинка статора, bz – ширина зубца, τ – полюсное деление

Расчет по этой формуле производится с учетом того, что обмоточный коэффициент принят равным 0,93, падение напряжения в обмотке – равным 4% величины напряжения, и синусоидальности формы поля. При выполнении расчета электродвигателя, имеющего паспорт, но не имеющего обмотки, задаются величиной максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре с учетом типа электродвигателя.

Таблица 3.

Мощность электродвигателя *P, квт*	Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре B_B	
	гс	*вб/м³*
до 1,0	3500 – 6000	0,35 – 0,6
1,1 – 5,0	4500 – 7200	0,45 – 0,72
свыше 5	5000 – 8000	0,5 – 0,8

Ориентировочно при выборе максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре можно пользоваться табл. 3. При подсчете по формуле (15) числа эффективных проводов в пазе статора целесообразно пользоваться постоянными коэффициентами (табл. 4) для фазного напряжения 220 *в* при различном числе полюсов и числе пазов статора. Числовые значения постоянных коэффициентов приведены в табл. 4. Коэффициенты таблицы включают в себя величину:

$$C = \frac{2{,}6 \times U\text{ф} \times p}{Z}$$

Для определения числа эффективных проводов в пазе статора формула примет следующий вид:

$$N_{\Pi} = \frac{C \times 10^6}{D_B \times L \times B_B} \quad (16)$$

Таблица 4. Постоянные коэффициенты для подсчета числа эффективных проводов в пазе статора электродвигателя при фазном напряжении *220 в*.

z	$2p$			
	2	4	6	8
18	31,8	63,6	95,2	–
24	23,8	47,6	–	95,2
27	21,2	42,4	63,6	84,8
30	19,1	38,2	–	76,4
36	15,9	31,8	47,6	63,6
48	11,9	23,8	–	47,6
54	–	21,2	31,8	42,4
72	–	15,9	23,8	31,8

Например, для электродвигателя с числом полюсов $2p$ = 4 и числом пазов Z = 36 количество эффективных проводов в пазе по формуле (16) равно:

$$N_{\text{п}} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{D_B \times L \times B_B}$$

где: число 31,8 взято из табл. 4. Если быть уверенным, что величина максимальной индукции в воздушном зазоре выбрана правильно, то на этом можно было бы окончить определение числа эффективных проводов в пазе. Однако даже опытный расчетчик не в состоянии точно определить, какая величина индукции соответствует данному электродвигателю, так как она различна не только для различных типов электродвигателей, но даже при одном типе и колеблется в больших пределах. Так в электродвигателях типа Р максимальная индукция в воздушном зазоре находится в пределах 5600 – 7200 *гс.*, в электродвигателях типа АД – в пределах 5000 – 8300 *гс.*, в электродвигателях типа МА 5000 – 9300 *гс.*, в электродвигателях типа ТТ 3800 – 7200 *гс*, в электродвигателях типов МКА, МКВ – 4500 – 7900 *гс*. Не в меньших пределах величина максимальной индукции в воздушном зазоре колеблется и в электродвигателях иностранных фирм. Поэтому при расчете обмоток следует проверять правильность выбранной величины максимальной индукции в воздушном зазоре с вычислением магнитных нагрузок в зубце и спинке активной стали статора.
Индукцию в зубце статора можно проверять по следующей формуле:

$$Bz = 3{,}5 \times \frac{B_B \times D_B}{Z \times bz} \quad (17)$$

где: B_B – максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*. D_B – внутренний диаметр статора, *см*., Z – число пазов статора; bz – расчетная ширина зубца, *см*. 3,5 – коэффициент, включающий в себя постоянные величины и коэффициент заполнения стали, принятый равным 0,9. Расчетную ширину зубца берут между самым широким и самым узким размерами зубца, отступая на ⅓ длины от узкой в сторону широкой.
Индукцию в спинке статора можно проверять по формуле:

$$Ba = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times hc} \quad (18)$$

где: B_B – максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*; D_B – внутренний диаметр статора, *см*.; p – число пар полюсов; hc – высота спинки статора, *см*.; 0,6 – коэффициент, включающий в себя коэффициент магнитного перекрытия, принятый равным 0,7, коэффициент заполнения активной стали, принятый равным 0,9 и постоянные величины.

Вычисленные магнитные индукции в зубце статора должны находиться в пределах 13000–17000 *гс.*, а в спинке статора – в пределах:

при $2p = 2$: 12000 – 17 000 *гс.*
$2p > 2$: 10000 – 15000 *гс.*

Если индукция в зубце и спинке статора значительно отклоняется от указанных выше предельных величин, надлежит увеличить или уменьшить величину максимальной индукции в воздушном зазоре и в зависимости от полученных результатов окончательно подсчитать число эффективных проводов в пазе. При пересчете целесообразно применить способ пропорционального пересчета.

Если напряжение электродвигателя отличается от $U_Ф$ = 220 в, принятого по табл. 4, то коэффициент по табл. 4 следует увеличить или уменьшить пропорционально изменению напряжения. Например, при *Uф* = 380 *в* постоянный коэффициент умножается на 1,73, при *Uф* = 127 *в* делится на 1,73, а при *Uф* = 290 *в* умножается на 220/290 = 1,32 и т. д.

При расчетах обмотки электродвигателя, не имеющего паспортных данных и старой обмотки, расчет приходится вести, задавшись наиболее вероятной скоростью вращения электродвигателя, исходя из конфигурации сердечника статора. Сравнительно большая высота спинки статора свидетельствует о быстроходности электродвигателя, а малая – о тихоходности. Выполнив расчет, можно по величине магнитной индукции в спинке статора определить, правильно ли задались скоростью вращения электродвигателя. Если магнитная индукция в спинке статора резко не выходит за пределы допустимых величин, то принятая при расчете скорость вращения соответствует паспортной. При малых индукциях в спинке статора расчет следует повторить, приняв более высокую скорость вращения, а при больших индукциях – наоборот. При определении приемлемости принятой индукции имеется в виду, что в воздушном зазоре и зубце статора она также не выходит из предела допустимых величин.

Для определения числа полюсов электродвигателя можно пользоваться формулой, позволяющей определить наименьшее число полюсов, допустимое в данном электродвигателе:

$$2p = 0{,}5 \times \frac{D_B}{hc} \qquad (19)$$

где: D_B – внутренний диаметр статора, *см.*; hc – высота спинки статора, *см*. Полученный результат следует округлить до ближайшего четного числа. Число полюсов электродвигателя можно точнее определить по формуле:

$$2p = \frac{B_B \times D_B \times L}{Ba \times Lc \times hc} \qquad (20)$$

где: B_B – максимальная индукция в воздушном зазоре, *гс*. D_B – внутренний диаметр статора, *см*. L – длина активной стали статора без вентиляционных каналов, *см*. Ba – индукция в спинке статора, *гс*., Lc – чистая длина активной стали статора без изоляции между листами сердечника, *см*., hc – высота спинки статора, *см*.

При определении числа полюсов электродвигателя по формуле (20) следует задаться максимальной индукцией в воздушном зазоре B_B и индукцией в спинке статора Ba. Полученное число полюсов следует округлить до ближайшего четного числа и повторно определить величину индукции в спинке статора. Если индукция в спинке статора все же будет выходить за пределы допустимых величин, следует изменить максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре до величины, при которой индукция в спинке статора будет находиться в пределах норм. По формуле (17) определяют индукцию в зубце статора, а по формуле (16) – число эффективных проводов в пазе.

При проведении сокращенного расчета предполагалось, что ремонтируемый электродвигатель не имеет обмотки. Если же необходимо только проверить правильность старой обмотки электродвигателя, подлежащей замене, то повторных пересчетов для определения максимальной индукции в воздушном зазоре не требуется, так как она будет определена по фактическому числу эффективных проводов в пазе. Перерасчет потребуется только в случае, если у поступившего в ремонт электродвигателя неправильная обмотка, что может быть определено по величине магнитных нагрузок в воздушном зазоре, зубце и спинке статора. Следующей стадией расчета будет определение сечения обмоточного провода новой обмотки. Сечение одного эффективного провода с изоляцией определится по формуле:

$$F_{ИЗ} = \frac{k_П \times S_П}{N_П} \quad мм^2 \quad (21)$$

где: $k_П$ – коэффициент заполнения паза; $S_П$ – площадь паза; $N_П$ – количество эффективных проводов в пазе.

Коэффициент заполнения паза принимается, исходя из данных, изложенных в предварительных сведениях к расчету. Площадь паза легко подсчитать, сделав оттиск его на миллиметровой бумаге и построив на нем равновеликий прямоугольник. Далее выбирают число параллельных ветвей и число параллельных проводов в зависимости от величины полученного при расчете сечения одного эффективного провода с изоляцией. Сечение одного элементарного провода с изоляцией подсчитаем по формуле:

$$S_{1ИЗ} = \frac{F_{ИЗ}}{a \times b} \quad (22)$$

где: a – число параллельных ветвей; b – число параллельных проводов. Число параллельных проводов и параллельных ветвей выбирается так, чтобы элементарный провод свободно входил в шлиц паза статора. Диаметр элементарного изолированного провода определяется или по таблице перевода сечений в диаметры, или по формуле:

$$d_{ИЗ} = 1{,}13 \times \sqrt{S_{1ИЗ}}$$

Диаметр голого провода определяется методом вычитания от изолированного провода толщины его изоляции:

$$d = d_{ИЗ} - \delta_{ИЗ}$$

где: $\delta_{ИЗ}$ – двусторонняя толщина изоляции. Величину $\delta_{ИЗ}$ можно брать из каталогов и справочников или по приложению 4.

По диаметру голого провода найдем его сечение. Если нет уверенности в правильном выборе коэффициента заполнения паза, можно один паз статора заполнить пазовой изоляцией и проводом полученного сечения и подсчитать фактическое количество проводов. Если расчетное количество элементарных проводов не вмещается в паз, необходимо сечение провода уменьшить и, наоборот, если паз не заполняется, следует сечение увеличить. В обоих случаях производится перерасчет сечения. Практически это выполняется так.

Заполняют данным проводом изолированный паз, оставив место для клина. Подсчитывают количество вложенных элементарных проводов. Вычисляют суммарную площадь, занятую медью, перемножением количества элементарных проводов на их сечение. Полученную площадь меди делят на расчетное количество элементарных проводов с изоляцией.

По полученному сечению элементарного провода находят его диаметр по таблице или расчету:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times S_1}{\pi}} = 1{,}13 \times \sqrt{S_1}$$

При переходе на иной вид изоляции провода вычисляют не суммарную площадь меди, а суммарную площадь изолированных проводов, разделив которую на расчетное количество элементарных проводов, определяют сечение элементарного провода с изоляцией, а за вычетом двусторонней толщины изоляции – и диаметр голого провода. Зная сечение обмоточного провода, можно вычислить плотность тока и сравнить ее с допустимой для электродвигателей данного типа:

$$\Delta = \frac{I\text{ф}}{a \times b \times S_1} \qquad (23)$$

где: *Iф* – фазный ток электродвигателя, (при соединении обмотки звездой *Iф* = *Iл*; при соединении треугольником $I\text{ф} = I\text{л}/\sqrt{3}$, *a* – число параллельных ветвей; *b* – число параллельных проводов; S_1 – сечение элементарного провода; *Iл* – линейный ток. Допустимую плотность тока можно определить по табл. 5. Для электродвигателей закрытого и взрывобезопасного исполнений плотности тока берутся ближе к нижнему пределу. Для обмоток фазных роторов плотность тока берется в 1,35–1,45 раза большей, чем для обмоток статора.

Таблица 5. Рекомендуемые плотности тока.

Мощность электродвигателя, *квт*	Синхронная скорость вращения *об. мин.*	Плотность тока в обмотке статора, *а/мм²*
0,1 – 1,0	3000	4,5–6,8
	1500	4,0–6,3
1,1 – 5,0	3000	5,5–7,5
	1500	4,8–7,2
	1000	4,5–6,7
5,1 – 10,0	3000	5,0–7,2
	1500	4,5–7,0
	1000	4,3–6,5
	750	4,1–6,2
10,1 – 25,0	3000	5,0–7,0
	1500	4,5–6,5
	1000	4,3–6,3
	750	4,1–6,0
25,1 – 100	3000	4,8–6,6
	1500	4,3–6,0
	1000	4,0–5,5
	750	3,8–5,3

Если мощность электродвигателя не известна, то задаются плотностью тока и определяют фазный ток электродвигателя, после чего вычисляют мощность электродвигателя:

$$P = \frac{3 \times U\text{ф} \times I\text{ф} \times cos\varphi \times \eta}{1000} \quad \text{квт} \qquad (24)$$

где: *Uф* – фазное напряжение; *Iф* – фазный ток. Косинус φ и *кпд* берутся в зависимости от мощности и скорости вращения электродвигателя. Таблицы значений косинуса φ и *кпд* приведены в приложениях 5 и 6.

21. Расчет обмотки ротора.

При ремонте расчет обмотки фазного ротора производят если в нем отсутствует старая обмотка или при необходимости изменения скорости вращения. При пересчете обмотки статора на новое напряжение не требуется производить пересчета обмотки ротора; напряжение на его кольцах, а также фазный ток будут прежними. Порядок расчета фазного ротора при отсутствии обмотки в нем следующий: *эдс* фазного ротора при режиме короткого замыкания равна:

$$E\text{ф}_2 = E\text{ф}_1 \times \frac{kw_2 \times w_2}{kw_1 \times w_1} \text{ вольт} \quad (25)$$

где: $E\text{ф}_2$ – фазная *эдс* ротора; $E\text{ф}_1$ – фазная *эдс* статора; kw_2 – обмоточный коэффициент обмотки ротора; kw_1 – обмоточный коэффициент обмотки статора; w_2 – число эффективных витков в фазе обмотки ротора; w_1 – число эффективных витков в фазе обмотки статора.

Если пренебречь падением напряжения в обмотках статора и ротора, которые незначительны по величине, и обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора приравнять, что также допустимо, то для определения фазного напряжения на разомкнутых кольцах ротора можно применить следующую формулу:

$$U\text{ф}_2 = U\text{ф}_1 \times \frac{w_2}{w_1} \text{ в} \quad (26)$$

откуда:

$$w_2 = \frac{w_1 \times U\text{ф}_2}{U\text{ф}_1} \quad (27)$$

где: $U\text{ф}_2$ – фазное напряжение на кольцах ротора; $U\text{ф}_1$ – фазное напряжение статора.

Поскольку в формулах (26) и (27) неизвестными являются фазное напряжение на кольцах ротора и число эффективных витков в фазе обмотки ротора, величиной напряжения обмотки ротора следует задаться. При выборе линейного напряжения на кольцах ротора можно пользоваться табл. 6.

Таблица 6. Величина линейного напряжения на кольцах ротора в зависимости от мощности электродвигателя.

Вид обмотки	Линейное напряжение на кольцах ротора, *в*	
	P = 3 ÷ 20 *квт*	P = 20 ÷100 *квт*
Волновая стержневая	100 – 290	150 – 290
Катушечная	100 – 290	220 – 340

Фазное напряжение обмотки звездой будет равно:

$$U\text{ф}_2 = \frac{U_{\text{Л}2}}{\sqrt{3}} \quad \text{в}$$

Число эффективных витков в фазе обмотки статора определяют по формуле:

$$w_1 = \frac{N_{\text{П}1} \times Z_1}{2 \times m_1} = \frac{N_{\text{П}1} \times Z_1}{2 \times 3} = \frac{N_{\text{П}1} \times Z_1}{6} \quad (28)$$

где: w_1 – число эффективных витков в фазе обмотки статора; $N_{\text{П}1}$ – число эффективных проводов в пазе статора; Z_1 – число пазов статора; m_1 – число фаз обмотки статора.

Вычислив число эффективных витков в фазе обмотки ротора, определяют число эффективных проводов в пазе ротора по формуле:

$$N_{П2} = \frac{2 \times m_2 \times w_2}{Z_2} = \frac{2 \times 3 \times w_2}{Z_2} = \frac{6 \times w_2}{Z_2} \quad (29)$$

где: $N_{П2}$ – число эффективных проводов в пазе ротора; m_2 – число фаз обмотки ротора; w_2 – число эффективных витков в фазе обмотки ротора; Z_2 – число пазов ротора.
Определяют ток ротора:

$$I\text{ф}_2 = (0{,}9 \div 0{,}85) \times I\text{ф}_1 \times \frac{w_1}{w_2} \;\; a \quad (30)$$

где: $U\phi_2$ – фазный ток ротора; $U\phi_1$ – фазный ток статора.

Задаются плотностью тока в обмотке ротора, исходя из соображений, изложенных в предварительных сведениях к расчету, выбирают число параллельных ветвей и параллельных проводов и определяют сечение элементарного провода обмотки ротора:

$$S_2 = \frac{I\text{ф}_2}{a_2 \times b_2 \times \Delta_2} \quad \text{мм}^2 \quad (31)$$

где: S_2 – сечение элементарного провода обмотки ротора, *мм*^{2}; a_2 – число параллельных ветвей обмотки ротора; b_2 – число параллельных проводов обмотки ротора; Δ_2 – плотность тока в обмотке ротора, $a/мм^2$. По сечению определяют диаметр провода, где $d = \sqrt{\frac{4 \times S_2}{\pi}}$ или по справочной таблице. Диаметр изолированного провода равен:

$$d_{ИЗ2} = d_2 + \delta_{ИЗ}$$

где: $d_{ИЗ2}$ – диаметр изолированного провода обмотки ротора; d_2 –диаметр провода обмотки ротора; $\delta_{ИЗ}$ – двусторонняя толщина изоляции провода. По диаметру изолированного провода определяют и его сечение. Для определения коэффициента заполнения паза ротора снимают при помощи бумаги оттиск паза и на нем строят равновеликий прямоугольник и вычисляют площадь паза $S_{П2}$ и коэффициент его заполнения, пользуясь формулой:

$$k_{П2} = \frac{S_{ИЗ2} \times N}{S_{П2}} \quad (32)$$

где: N – количество элементарных проводов в пазе ротора.

Коэффициент заполнения паза должен находиться в пределах величин, указанных в предварительных сведениях к расчету. Для стержневой обмотки коэффициент заполнения паза обычно равен 0,46 – 0,55. При значительных отклонениях коэффициента заполнения паза от нормальной величины следует заполнить один паз ротора проводом сечения, полученного при расчете, и подсчитать число проводов. Если расчетное число элементарных проводов не вместилось в паз, следует диаметр провода уменьшить; если же не заполняется паз, диаметр провода следует увеличить.

22. Пересчет электродвигателя на другую скорость вращения.

Чтобы изменить скорость вращения электродвигателя, необходимо изменить число полюсов в статоре и фазном роторе. Это достигается изменением шага и числа катушек в катушечной группе в обмотках статора и фазного ротора при перемотке электродвигателя.

Перевод электродвигателя на другое число полюсов при неизменном напряжении, частоте и индукции в воздушном зазоре связан с изменением магнитного потока, который изменяется обратно пропорционально числу полюсов и прямо пропорционально скорости вращения. Если четырехполюсный электродвигатель переделать на двухполюсный, т. е. уменьшить число полюсов в 2 раза, то полюсное деление τ и сечение* в воздушном зазоре также увеличатся в 2 раза, в результате чего при прежнем значении максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре магнитный поток увеличится в 2 раза. Так как напряжение и частота остаются без изменения, с увеличением магнитного потока, приходящегося на полюс, в 2 раза необходимо уменьшить и число эффективных проводов в пазе статора в 2 раза, что дает возможность сечение обмоточного провода увеличить в 2 раза и соответственно увеличить мощность.
Обозначим скорость вращения, мощность, число эффективных проводов в пазе и сечение эффективного провода принятыми ранее буквами с индексом "ст" для старых данных и индексом "нов" для новых данных и установим соотношение между ними.

*Сечением в воздушном зазоре называется поверхность расточки статора, равная произведению полюсного деления τ на расчетную длину статора Li и коэффициент магнитного перекрытия α. Расчетная длина равна полусумме длин сердечника статора с вентиляционными каналами и без них.

Число эффективных проводов в пазе при переходе на новую скорость вращения изменяется пропорционально старой скорости вращения и обратно пропорционально новой скорости вращения:

$$N_{\text{пнов}} = N_{\text{пст}} \times \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{нов}}} \quad (33)$$

При переходе на новую скорость вращения мощность изменяется примерно пропорционально новой скорости вращения и обратно пропорционально старой скорости вращения:

$$P_{\text{нов}} \approx P_{\text{ст}} \times \frac{n_{\text{нов}}}{n_{\text{ст}}} \quad (34)$$

Учитывая изменения коэффициента мощности и *кпд* при новой скорости вращения электродвигателя, его новая мощность будет равна:

$$P_{\text{нов}} \approx P_{\text{ст}} \times \frac{n_{\text{нов}} \times cos\varphi_{\text{нов}} \times \eta_{\text{нов}}}{n_{\text{ст}} \times cos\varphi_{\text{ст}} \times \eta_{\text{ст}}} \quad (35)$$

Сечение эффективного провода при переходе на новую скорость вращения изменяется пропорционально старому числу эффективных проводов в пазе и обратно пропорционально новому числу эффективных проводов в пазе:

$$F_{\text{нов}} = F_{\text{ст}} \times \frac{N_{\text{пст}}}{N_{\text{пнов}}} \quad (36)$$

Необходимо подчеркнуть, что пользоваться приведенными выше формулами (33), (34), (35) и (36) можно лишь в том случае, если максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре оставлена при пересчете электродвигателя на другую скорость вращения неизменной, что не всегда удается. Электродвигатели в большинстве случаев конструируют так, чтобы полностью использовать активную сталь, не допуская резерва для значительного увеличения магнитных нагрузок.

При уменьшении скорости вращения электродвигателя затруднений для сохранения прежней величины максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре не встречается; число полюсов увеличится, полюсное деление τ уменьшится, магнитный поток уменьшится. Уменьшение магнитного потока вызовет соответственное увеличение числа эффективных проводов в пазе, уменьшение эффективного сечения провода и снижение мощности электродвигателя. Магнитная индукция в зубце статора останется прежней, а магнитная индукция в спинке сердечника статора снизится.

При увеличении скорости вращения в 1,5 и особенно в 2 раза часто нельзя сохранить максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре неизменной из – за сильно возрастающей магнитной индукции в спинке статора. В этих случаях максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре уменьшают до такой величины, при которой магнитная индукция в спинке статора не будет выходить за пределы допустимых величин. Уменьшение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре повлечет за собой увеличение числа эффективных проводов в пазе против величины, вычисленной по формуле (33), поэтому и сечение эффективного провода придется уменьшить; в связи с этим снизится и мощность электродвигателя по сравнению с величиной, вычисленной по формуле (35). Поэтому при пересчете электродвигателей на большую скорость вращения необходимо производить расчет магнитных нагрузок и не ограничиваться только формулами (33), (34), (35) и (36), которыми в основном можно пользоваться при уменьшении скорости вращения электродвигателя.
Ход расчета обмотки фазного ротора при переходе на другие скорости вращения показан в примере расчетов.
При пересчетах электродвигателей на другую скорость вращения необходимо учитывать и следующее. При снижении скорости вращения ухудшается охлаждение электродвигателя, в связи с чем полученную по формуле (35) мощность рекомендуется уменьшить на 10 – 15%. При увеличении скорости вращения плотность тока можно повысить на 10 – 15% и соответственно мощность электродвигателя. При переходе на новую скорость вращения может измениться номинальный вращающий момент электродвигателя, поэтому в таких случаях следует предварительно рассчитать достаточность момента для данной нагрузки. Для определения номинального вращающего момента электродвигателя применяется следующая формула:

$$M = \frac{P \times 975}{n} \ \text{кг} \times \text{м}. \quad (37)$$

где: P – номинальная мощность электродвигателя, *квт*; *n* – скорость вращения электродвигателя, *об. мин.* Чтобы не допустить снижения номинального вращающего момента при переходе на другую скорость вращения и повысить пересчитанную на новую скорость вращения мощность электродвигателя, целесообразно применить провод с более тонкой и более нагревостойкой изоляцией. При увеличении скорости вращения электродвигателя нагрев подшипников увеличивается, а при уменьшении скорости вращения он уменьшается. Следовательно, при увеличении скорости вращения электродвигателя потребуется усилить контроль за температурой подшипников. При переходе на большую скорость вращения необходимо проверить окружную скорость ротора по формуле:

$$\upsilon_{\text{Р}} = \frac{\pi \times D_2 \times n}{60 \times 1000} \quad \text{м/сек} \ (38)$$

где: $\upsilon_{\text{Р}}$ –окружная скорость ротора, *м/сек.*; D_2 – диаметр ротора, *мм*.
Окружная скорость фазного ротора не должна превышать 30 – 40 *м/сек.*, а короткозамкнутого 40 – 60 *м/сек*. При переходе на большую скорость вращения необходимо усилить бандаж фазного ротора.

При перемотке обмоток электродвигателя на большую скорость вращения увеличивается шаг обмотки, что способствует увеличению длины вылета лобовых частей. Поэтому следует проверить, особенно при переходе на 3000 *об. мин.*, допускает ли глубина подшипниковых щитов размещение удлиненных лобовых частей обмотки статора. В противном случае можно взять укорочение обмотки по пазам больше, чем 0,8 y, и не ниже 0,7 y.

23. Пересчет электродвигателя при замене материала обмоточного провода.

При ремонте электродвигателей иногда приходится производить замену материала обмоточных проводов, например вместо медных проводов применять алюминиевые и наоборот. Удельное электрическое сопротивление алюминиевых проводов больше медных в 1,63 раза ($\rho_{\text{МЕД}}$ = 0,0175; $\rho_{\text{АЛ}}$ = 0,0285 *ом* × *мм*^{2} × *м*). Поэтому замена медного провода алюминиевым того же сечения приведет или к снижению мощности электродвигателя в 1,63 раза, или при сохранении мощности к увеличению потерь в обмотке статора электродвигателя, более чем на 63%, что снизит *кпд* электродвигателя, увеличит нагрев обмотки и сократит срок его службы. Чтобы избежать указанных выше нежелательных последствий, следует максимально увеличить сечение алюминиевого провода за счет:

1) применения более тонкой изоляции проводов и изоляции паза;
2) повышения коэффициента заполнения паза статора;
3) выполнения обмотки в один провод вместо двух параллельных проводов и повышения магнитных нагрузок, если расчетом будет установлено, что они занижены.

Проведенные некоторыми заводами и научно – исследовательскими институтами исследовательские работы подтвердили возможность замены медных обмоточных проводов алюминиевыми даже без снижения мощности для некоторых старых типов электродвигателей и единой серии (А и АО) мощностью до 100 *квт*. Для замены провода в каждом отдельном случае необходимо проводить пересчет электродвигателя по следующему методу.

Пример. Требуется пересчитать электродвигатель для замены медного провода алюминиевым. Технические данные электродвигателя и данные замеров:

Тип электродвигателя А51–4
Мощность P = 4,5 *квт*.
Напряжение U = 220/380 *в*
Ток I = 16,3/9,4 *а*
Скорость вращения n = 1500 *об. мин.*
Внутренний диаметр статора D_B = 152 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 90 *мм*.
Число пазов статора Z = 36
Ширина зубца статора bz = 7 *мм*.
Высота спинки статора hc = 24,5 *мм*.
Число эффективных проводов в пазе $N_{\text{П}}$ = 32
Провод ПЭЛБО 1,62 *мм*., в один провод, обмотка однослойная без параллельных ветвей, сечение эффективного провода F = 2,06 *мм*^{2}
Ротор – короткозамкнутый.

Вычисляют плотность тока в обмотке статора при медном проводе:

$$\Delta_{\text{м}} = \frac{I}{F} = \frac{9,4}{2,06} = 4,56 \quad a/\text{мм}^2$$

Вычисляют равноценную по нагреву плотность тока для алюминиевых проводов:

$$\varDelta_{\text{эл}} = \varDelta_{\text{м}} \times \frac{\rho_{\text{М}}}{\rho_{\text{АЛ}}} = 4{,}56 \times \frac{0{,}0175}{0{,}0285} = 2{,}81\ \ a/\text{мм}^2$$

Вычисляют магнитные нагрузки:

$$B_B = \frac{C \times 10^6}{D_B \times L \times N_{\text{П}}} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{15{,}2 \times 9{,}0 \times 32} = 7300 \text{ гс}$$

$$B_Z = 3{,}5 \times \frac{B_B \times D_B}{Z \times bz} = 3{,}5 \times \frac{7300 \times 15{,}2}{36 \times 0{,}7} = 15500 \text{ гс}$$

$$B_a = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times hc} = 0{,}6 \times \frac{7300 \times 15{,}2}{2 \times 2{,}45} = 13600 \text{ гс}$$

Таким образом, увеличивать сечение алюминиевого провода за счет уменьшения числа эффективных проводов в пазе и соответствующего увеличения магнитных нагрузок нецелесообразно. Вычисляют коэффициент заполнения паза статора. Площадь паза, замеренная или по каталогу:

$$S_{\text{П}} = 206{,}5 \text{ мм}^2$$

Диаметр медного провода с изоляцией:

$$d_{\text{ИЗ}} = d + \delta_{\text{ИЗ}} = 1{,}62 + 0{,}21 = 1{,}83 \text{ мм.}$$

Сечение эффективного провода с изоляцией:

$$F_{\text{ИЗ}} = \frac{\pi \times d_{\text{ИЗ}}^2}{4} = \frac{3{,}14 \times 1{,}83^2}{4} = 2{,}64 \text{ мм}^2$$

Сечение всех эффективных проводов с изоляцией:

$$F_{\text{ИЗ}} \times N_{\text{П}} = 2{,}64 \times 32 = 84{,}5 \text{ мм}^2$$

Коэффициент заполнения паза:

$$k_{\text{П}} = \frac{F_{\text{ИЗ}} \times N_{\text{П}}}{S_{\text{П}}} = \frac{84{,}5}{206{,}5} = 0{,}41$$

Таким образом, коэффициент заполнения паза можно увеличить за счет лучшего использования паза и меньшей жесткости алюминиевых проводов по сравнению с медными. Возьмем $k'_{\text{П}} = 0{,}45$.

Пересчитывают сечение эффективного провода с изоляцией, учитывая новый коэффициент заполнения паза:

$$F'_{\text{ИЗ}} = F_{\text{ИЗ}} \times \frac{k'_{\text{П}}}{k_{\text{П}}} = 2{,}64 \times \frac{0{,}45}{0{,}41} = 2{,}9 \quad \text{мм}^2$$

что соответствует диаметру $d'_{\text{ИЗ}} = 1{,}95$ *мм*. Выбирают алюминиевый провод марки ПЭВА – 2 диаметром $d' = 1{,}88$ *мм*. с изоляцией $\delta_{\text{ИЗ}} = 0{,}08$ *мм*. Сечение провода $F' = 2{,}78$ *мм*².

При выборе диаметра изолированного провода необходимо учитывать ширину шлица паза.

Вычисляют ток, исходя из сечения алюминиевого провода и вычисленной ранее плотности тока для алюминиевого провода:

$$I' = \varDelta_{\text{АЛ}} \times F' = 2{,}81 \times 2{,}78 = 7{,}8 \quad a$$

Вычисляют величину новой мощности электродвигателя:

$$P' = P \times \frac{I'}{I} = 4{,}5 \times \frac{7{,}8}{9{,}4} = 3{,}73 \quad \text{квт}$$

Вычисляют, во сколько раз уменьшена мощность электродвигателя при переходе на алюминиевый обмоточный провод:

$$\frac{P'}{P} = \frac{4{,}5}{3{,}73} = \ 1{,}205, \text{т. е. на } 20{,}5\%$$

Учитывая, что в данном примере применена изоляция провода типа винифлекс, для которой допустимое превышение температуры составляет 85°С, следует считать возможным повысить плотность тока в обмотке статора данного электродвигателя на 20%, установив номинальную мощность его 4,5 *квт*. Пересчитанный электродвигатель в связи с заменой медного обмоточного провода алюминиевым может работать при мощности 4,5 *квт*; при этом незначительно возрастут его потери из – за увеличения нагрева обмотки статора и соответственно несколько снизится *кпд*.

24. Пересчет электродвигателя при изменении частоты.

При пересчете электродвигателя на другую частоту следует руководствоваться формулой (12), которую можно записать в следующем виде, формула (39):

$$U \approx E = k \times f_1 \times \Phi \qquad (39)$$

или

$$\Phi = \frac{E}{k \times f_1} \approx \frac{U}{k \times f_1}$$

где: k – коэффициент, включающий в себя постоянные величины и величины, зависящие от данных обмотки; f_1 – частота питающей сети; $\varPhi$ – магнитный поток; U – напряжение сети.

Из приведенных формул видно, что при изменении частоты в сети и сохранении обмоточных данных у электродвигателя следует в таком же соотношении изменить напряжение сети и тем самым сохранить неизменным магнитный поток. В этом случае, т. е. при изменении напряжения пропорционально изменению частоты, электродвигатель при сохранении неизменным момента вращения будет работать с практически неизменными значениями кпд, $cos\varphi$ и перегрузочной способности.

В таком режиме работает, например, электроверетено ЭВ–3, предназначенное для прядения и кручения вискозного волокна. При работе электроверетена со скоростью вращения 8000 *об. мин.* (синхронных) питающая сеть имеет частоту 133 *гц* и напряжение 104 *в*, а при работе электроверетена со скоростью 9000 *об. мин.* (синхронных) питающая сеть должна иметь частоту 150 *гц* и напряжение 117 *в*.

При переходе на другую частоту без изменения напряжения сети следует изменить обмоточные данные статора электродвигателя и этим оставить магнитный поток прежним, что следует из формулы (40):

$$\Phi = \frac{U}{f \times w} \quad (40)$$

Пересчет электродвигателя на другую частоту при неизменном напряжении производят по формулам:
а) число эффективных витков в фазе обмотки статора:

$$w_{\text{НОВ}} = w_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{СТ}}}{f_{\text{НОВ}}}$$

б) число эффективных проводов в пазе:

$$N_{\text{ПНОВ}} = N_{\text{ПСТ}} \times \frac{f_{\text{СТ}}}{f_{\text{НОВ}}}$$

в) сечение эффективного провода:

$$F_{\text{НОВ}} = F_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{СТ}}}{f_{\text{НОВ}}}$$

г) мощность при новой частоте по формуле (41):

$$P_{\text{НОВ}} = P_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{НОВ}}}{f_{\text{СТ}}} \quad (41)$$

При значительном повышении частоты (200 – 500 *гц*) необходимо несколько ограничить повышение мощности (на 15–35%) вследствие снижения *кпд* из–за увеличения потерь в меди (явление поверхностного эффекта) и потерь в активной стали. Также необходимо учитывать изменение условий охлаждения при разных скоростях вращения. Так как переход на повышенную частоту влечет за собой увеличение скорости вращения электродвигателя, то при подобных пересчетах необходимо проверять окружную скорость ротора по формуле (38).

25. Примеры расчетов.

Пример. Требуется произвести сокращенный расчет обмотки статора электродвигателя с короткозамкнутым ротором, не имеющего технического паспорта обмотки.

Данные электродвигателя:
Скорость вращения n = 1500 *об. мин.*
Напряжение U = 220/380 *в*.

Результаты замеров:

Внутренний диаметр статора D_B = 145 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 200 *мм*.
Число пазов статора Z = 36
Ширина зубца статора (расчетная) bz = 6,8 *мм*.
Высота спинки статора hc = 28 *мм*.

Примечания:
1. Замеры производят в миллиметрах, а запись размеров в формулы для расчета производят в сантиметрах.
2. Измерение ширины зубца и спинки статора производят с точностью до 0,1 *мм*.

Задаются максимальной магнитной индукцией в воздушном зазоре B_B = 6900 *гс* и по табл. 4 постоянных коэффициентов для $2p = 4$ и $Z = 36$ пазов определяют величину C и число эффективных проводов в пазе статора:

$$N_{\Pi} = \frac{C \times 10^6}{D_B \times L \times B_B} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{14{,}5 \times 20{,}0 \times 6900} = 15{,}9$$

Число эффективных проводов в пазе статора принимается Nп = 16, а величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре не меняют в связи с небольшой разницей между взятыми эффективными проводами в пазе и полученными расчетами. Определяют магнитную индукцию в зубце статора:

$$B_Z = 3{,}5 \times \frac{B_B \times D_B}{Z \times bz} = 3{,}5 \times \frac{6900 \times 14{,}5}{36 \times 0{,}68} = 14200 \text{ гс}$$

Определяют магнитную индукцию в спинке статора:

$$B_a = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times hc} = 0{,}6 \times \frac{6900 \times 14{,}5}{2 \times 2{,}8} = 10700 \text{ гс}$$

Сравнивая полученные магнитные индукции с допустимыми по табл. 3, видим, что число эффективных проводов в пазе можно уменьшить и этим увеличить индукцию. Окончательно число эффективных проводов в пазе принимают N_{Π} = 15 и пересчитывают магнитные индукции:

$$B_B = \frac{6900 \times 16}{15} = 7400 \text{ гс}$$

$$Bz = \frac{14200 \times 16}{15} = 15200 \text{ гс}$$

$$Ba = \frac{10700 \times 16}{15} = 11400 \text{ гс}$$

По оттиску паза определяют сечение паза S_{Π} задаются коэффициентом заполнения паза k_{Π} и определяют сечение одного эффективного провода с изоляцией:

Сечение паза: $S_{\Pi} = 125$ мм^2

Для трапециевидного паза и однослойной обмотки: $k_{\Pi} = 0{,}41$

$$F_{ИЗ} = \frac{k_{\Pi} \times S_{\Pi}}{N_{\Pi}} = \frac{0{,}41 \times 125}{15} = 3{,}42 \quad \text{мм}^2$$

Определяют сечение одного элементарного провода с изоляцией, приняв число параллельных ветвей a = 1 и число параллельных проводов b = 2:

$$s_{1ИЗ} = \frac{F_{ИЗ}}{a \times b} = \frac{3{,}42}{1 \times 2} = 1{,}71 \quad \text{мм}^2$$

Определяют диаметр одного элементарного провода с изоляцией по переводной таблице или вычислением:

$d_{ИЗ}$ = 1,47 *мм*.

Определяют диаметр голого провода марки ПЭЛБО:

$$d = d_{ИЗ} - \delta_{ИЗ} = 1{,}47 - 0{,}21 = 1{,}26 \text{ мм.}$$

а по ГОСТ *d* = 1,25 *мм*., что соответствует сечению s_1 = 1,23 *мм*².
Задаются плотностью тока для медных проводов Δ = 6 *а*/*мм*² и вычисляют фазный ток электродвигателя:

$$I_Ф = \Delta \times b \times s_1 = 6 \times 2 \times 1{,}23 = 14{,}7\ a$$

По приложению 5 выбирают *кпд* и *cosφ*, где для электродвигателя 6–8 *квт кпд* = 0,87, *cosφ* = 0,86 и мощность равна:

$$P = \frac{3 \times Uф \times Iф \times cos\varphi \times \eta}{1000} = \frac{3 \times 220 \times 14{,}7 \times 0{,}86 \times 0{,}87}{1000} = 7{,}3 \text{ квт.}$$

Пример. Произвести поверочный расчет обмотки статора электродвигателя со следующими техническими данными: мощность 9,6 *квт*, напряжение 220/380 *а*, ток 34,3/19,8 *а*, скорость вращения 1000 *об. мин*., ротор – короткозамкнутый.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора D_B = 230 *мм*.
Длина активной стали статора (без вент. каналов) *L* = 156 *мм*.
Число пазов статора *Z* = 54
Ширина зубца статора *bz* = 5,2 *мм*.
Высота спинки статора *hc* = 21 *мм*.
Число элементарных проводов в пазе *N* = 32
Провод ПБД 1,74 *мм*. параллельно в два провода.
Шаг по пазам *y* = 1 – 9, обмотка двухслойная.

Величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_B = \frac{C \times 10^6}{D_B \times L \times N_П} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{23{,}0 \times 15{,}6 \times 16} = 5500 \text{ гс}$$

Так как элементарных проводов в пазе 32, а обмотка выполнена в два параллельных провода без параллельных ветвей, то число эффективных проводов в пазе $N_П$ = 16 (при наличии, например, трех параллельных ветвей и двух параллельных проводов число эффективных проводов в пазе было бы 32/3 × 2 = 5,33).

Магнитная индукция в зубце статора:

$$B_Z = 3{,}5 \times \frac{B_B \times D_B}{Z \times bz} = 3{,}5 \times \frac{5500 \times 23}{54 \times 0{,}52} = 15800 \text{ гс}$$

Магнитная индукция в спинке статора:

$$Ba = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times hc} = 0{,}6 \times \frac{5500 \times 23}{3 \times 2{,}1} = 12100 \text{ гс}$$

Плотность тока в обмотке статора:

$$\Delta = \frac{I\text{ф}}{a \times b \times s_1} = \frac{19{,}8}{1 \times 2 \times 2{,}378} = 4{,}2 \quad a/\text{мм}^2$$

где: *Iф* – фазный ток обмотки статора, равный при соединении звездой линейному току; *a* – число параллельных ветвей в обмотке статора; *b* – число параллельных проводов в обмотке статора; s_1 – сечение элементарного провода обмотки статора.
Так как магнитные индукции и плотность тока здесь не выходят за пределы допустимых величин (см. табл. 3 и 5), число эффективных проводов в пазе обмотки статора и диаметр провода соответствуют данным этого электродвигателя.

Пример. Требуется перемотать электродвигатель с напряжением 127/220 на 220/380 *в*. Данные электродвигателя: мощность 37 *квт*. напряжение 127/220 *в*; ток 230/133 *а*; скорость вращения 750 *об. мин.*, ротор – фазный; обмотки статора и ротора соединены звездой.
Данные замеров:

Внутренний диаметр статора D_B = 365 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 210 *мм*.
Число пазов статора Z = 72
Число элементарных проводов в пазе N = 21
Число параллельных ветвей a = 2
Провод ПБД 2,63 *мм*., сечение s_1 = 5,432 *мм²*
Число параллельных проводов b = 3
Шаг по пазам 1 – 10, обмотка однослойная.

Число эффективных проводов в пазе обмотки статора:

$$N_{\text{ПСТ}} = \frac{N}{a \times b} = \frac{21}{2 \times 3} = 3{,}5$$

Необходимое число эффективных проводов в пазе обмотки статора при напряжении 220/380 *в*:

$$N_{\text{ПНОВ}} = N_{\text{ПСТ}} \times \frac{U_{\text{ФНОВ}}}{U_{\text{ФСТ}}} = 3{,}5 \times \frac{220}{127} = 6{,}1$$

Сечение эффективного провода обмотки статора при напряжении 127/220 *в*:

$$F_{\text{СТ}} = s_{1\text{СТ}} \times a \times b = 5{,}432 \times 2 \times 3 = 32{,}5 \quad \text{мм}^2$$

Необходимое сечение эффективного провода при напряжении 220/380 *в*:

$$F_{\text{НОВ}} = F_{\text{СТ}} \times \frac{U\text{ф}_{\text{СТ}}}{U\text{ф}_{\text{НОВ}}} = 32{,}5 \times \frac{127}{220} = 18{,}8 \quad \text{мм}^2$$

Сечение элементарного провода при четырех параллельных ветвях и выполнении обмотки в один провод:

$$s_{1\text{НОВ}} = \frac{F_{\text{НОВ}}}{a \times b} = \frac{18{,}8}{4 \times 1} = 4{,}7 \quad \text{мм}^2$$

По сечению находят диаметр провода: 2,44 *мм*., что соответствует сечению S_1 = 4,676 *мм²*.

Ток при напряжении 220/380 *в*:

$$I\text{ф}_{\text{нов}} = I\text{ф}_{\text{ст}} \times \frac{U\text{ф}_{\text{ст}}}{U\text{ф}_{\text{нов}}} = 133 \times \frac{127}{220} = 76{,}5\ \ a$$

Число элементарных проводов в пазе статора при напряжении 220/380 *в*:

$$N_{\text{нов}} = N_{\text{пнов}} \times \text{a} \times b = 6{,}1 \times 4 \times 1 = 24{,}4$$

Принимается $N_{\text{НОВ}}$ = 25; тогда

$$N_{\text{пнов}} = \frac{25}{4 \times 1} = 6{,}25$$

В целях проверки подсчитывают:
величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B_B = \frac{\text{C} \times 10^6}{D_B \times L \times N_{\text{пнов}}} = \frac{31{,}8 \times 10^6}{36{,}5 \times 21 \times 6{,}25} = 6650\ \text{гс}$$

плотность тока в обмотке статора, $a/\text{мм}^2$:

$$\Delta = \frac{I\text{ф}_{\text{нов}}}{s_{1\text{нов}} \times a \times b} = \frac{76{,}5}{4{,}676 \times 4 \times 1} = 4{,}1$$

Величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре и плотность тока в обмотке статора не выходят за пределы допустимых величин (см. табл. 3 и 5). Обмотку ротора при пересчете электродвигателя на новое напряжение не меняют, так как напряжение на кольцах ротора и фазный ток при этом остаются прежними.

Пример. Требуется пересчитать электродвигатель типа АО51–4 на 3000 *об. мин.*
Технические данные: мощность 4,5 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 16,1/9,3 *а*, скорость вращения 1500 *об. мин.*, ротор короткозамкнутый.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора D_B = 152 *мм*.
Диаметр ротора D_2 = 151,2 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 90 *мм*.
Число, пазов статора Z = 36
Ширина зубца статора bz = 7 *мм*.
Высота спинки статора hc = 24,5 *мм*.
Число элементарных проводов в пазе N = 64
Провод ПЭЛБО 1,16 *мм*.; параллельных ветвей нет; параллельных проводов – 2 (следовательно, Nп = 32). Шаг по пазам 1 – 10; обмотка однослойная.

Определяют наименьшее число полюсов, допустимое для данного электродвигателя:

$$2p = 0{,}5 \times \frac{D_B}{hc} = 0{,}5 \times \frac{15{,}2}{2{,}45} = 3{,}1$$

Ближайшее четное число 4 и, если пренебречь 0,1, также 2. Следовательно, конструкция электродвигателя позволяет изменить скорость вращения с 1500 на 3000 *об. мин.*

Определяют число эффективных проводов в пазе при переходе на новую скорость вращения:

$$N_{\text{пнов}} = N_{\text{пст}} \times \frac{n_{\text{ст}}}{n_{\text{нов}}} = 32 \times \frac{1500}{3000} = 16$$

Вычисляют величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_B = \frac{\text{C} \times 10^6}{D_B \times L \times N_{\text{пнов}}} = \frac{15{,}9 \times 10^6}{15{,}2 \times 9 \times 16} = 7300 \text{ гс}$$

Вычисляют магнитную индукцию в спинке статора:

$$Ba = 0{,}6 \times \frac{B_B \times D_B}{p \times hc} = 0{,}6 \times \frac{7300 \times 15{,}2}{1 \times 24{,}5} = 27000 \text{ гс};$$

Так как индукция в спинке статора слишком велика, число эффективных проводов в пазе следует увеличить.
Величина магнитной индукции в спинке статора принимается Ba = 16500 *гс* и окончательно определяется число эффективных проводов в пазе:

$$N_{\text{пнов}} = 16 \times \frac{27000}{16500} = 26$$

Пересчитывают соответственно и величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре:

$$B_B = 7300 \times \frac{16}{26} = 4500 \text{ гс}$$

Определяют сечение элементарного провода при переходе с 32 эффективных проводов в пазе (при n = 1500 *об. мин.*) на 26, сечение элементарного провода при:

n = 1500 *об. мин.*, s_1 = 1,057 мм^2

Сечение эффективного провода:

$$F_{\text{ст}} = s_1 \times a \times b = 1{,}057 \times 1 \times 2 = 2{,}114 \quad \text{мм}^2$$

Новое сечение эффективного провода:

$$F_{\text{нов}} = F_{\text{ст}} \times \frac{N_{\text{пст}}}{N_{\text{пнов}}} = 2{,}114 \times \frac{32}{26} = 2{,}6 \text{ мм}^2$$

Принимают число параллельных проводов b = 2; определяют сечение элементарного провода при n =3000 *об. мин.*:

$$s_{1\text{нов}} = \frac{F_{\text{нов}}}{a \times b} = \frac{2{,}6}{1 \times 2} = 1{,}3 \quad \text{мм}^2$$

Принимается провод ПЭЛБО 1,30 *мм.*; $s_{1\text{нов}}$ = 1,327 *мм*^{2}. Число элементарных проводов в пазе:

$$N_{\text{нов}} = N_{\text{пнов}} \times a \times b = 26 \times 1 \times 2 = 52$$

Определяют плотность тока в обмотке статора при n = 1500 *об. мин.*:

$$\Delta_{\text{СТ}} = \frac{I\phi_{\text{СТ}}}{F_{\text{СТ}}} = \frac{9{,}3}{2{,}114} = 4{,}42\ \ a/\text{мм}^2$$

Определяют фазный ток при плотности тока $\Delta_{\text{НОВ}}$ = 5,1 *а/мм²* с учетом улучшения охлаждения при переходе с 1500 на 3000 *об. мин.*:

$$I_{\text{ФНОВ}} = \Delta_{\text{НОВ}} \times s_{1\text{НОВ}} \times a \times b = 5{,}1 \times 1{,}327 \times 1 \times 2 = 13{,}5\ a$$

Определяют новую мощность электродвигателя, приняв *кпд* и *cosφ* равными старым величинам:

$$P_{\text{НОВ}} = P_{\text{СТ}} \times \frac{I\phi_{\text{НОВ}}}{I\phi_{\text{СТ}}} = 4{,}5 \times \frac{13{,}5}{9{,}3} = 6{,}5\ \ \text{квт}$$

Вычисляют номинальный момент вращения на валу при старой и новой скоростях вращения:

$$M_{\text{СТ}} = \frac{P_{\text{СТ}} \times 975}{n_{\text{СТ}}} = \frac{4{,}5 \times 975}{1500} = 2{,}92\ \text{кг} \times \text{м}$$

$$M_{\text{НОВ}} = \frac{P_{\text{НОВ}} \times 975}{n_{\text{НОВ}}} = \frac{6{,}5 \times 975}{3000} = 2{,}11\ \text{кг} \times \text{м}$$

Определяют, во сколько раз новый вращающий момент меньше старого:

$$\frac{M_{\text{СТ}}}{M_{\text{НОВ}}} = \frac{2{,}92}{2{,}11} = 1{,}38\ \text{раза}$$

Вычисляют окружную скорость ротора:

$$\upsilon_{\text{Р}} = \frac{\pi \times D_2 \times n_{\text{НОВ}}}{60 \times 1000} = \frac{3{,}14 \times 151{,}2 \times 3000}{60 \times 1000} = 23{,}8\ \text{м/сек}$$

что находится в пределах допустимого.
Обмотку выполняют двухслойной с шагом 1 – 13, двумя катушечными группами в фазе и при шести катушках в группе.

Пример. Пересчитать электродвигатель с фазным ротором с 1500 на 750 *об. мин*. Технические данные электродвигателя типа Т; мощность 29 *квт*; напряжение 220/380 *в*; ток 97/56 *а*; скорость вращения n = 1500 *об. мин.*; напряжение на кольцах ротора $U_{\text{ЛИН2}}$ = 290 *в*; соединение обмотки ротора Y.

Данные замеров:

Внутренний диаметр статора D_B = 220 *мм*.
Диаметр ротора D_2 = 218,8 *мм*.
Длина активной стали статора (без вентиляционных каналов) L = 245 *мм*.
Число пазов ротора Z_2 = 48
Число пазов статора Z_1 = 36. Число элементарных проводов в пазе N_1 = 34

Провод ПБД 1,81 *мм*. параллельно в два, две параллельные ветви. Обмотка статора – однослойная катушечная (концентрическая); шаг по пазам: 1–8; 1–10; 1–12. Обмотка ротора – катушечная (концентрическая); шаг по пазам: 1–10; 1–12; 1–14; 1–16.

Число элементарных проводов в пазе N_2 = 5. Провод ПБД 3,53 *мм.*; обмотка выполнена в один провод без параллельных ветвей; $S_{1,2}$ = 9,787 *мм²*; $N_{П2}$ = 5; соединение обмотки ротора Y. Число эффективных проводов в пазе статора при n = 1500 *об. мин.*:

$$N_{П1СТ} = \frac{N_1}{a \times b} = \frac{34}{2 \times 2} = 8{,}5$$

Число эффективных проводов в пазе статора при переходе на новую скорость вращения:

$$N_{П1НОВ} = N_{П1СТ} \times \frac{n_{СТ}}{n_{НОВ}} = 8{,}5 \times \frac{1500}{750} = 17$$

Новое сечение провода обмотки статора:
сечение элементарного провода при n = 1500 *об. мин.*, s_1 = 2,573 *мм²*
сечение эффективного провода:

$$F_{СТ} = s_1 \times a \times b = 2{,}573 \times 2 \times 2 = 10{,}3 \text{ мм}^2$$

Новое сечение эффективного провода:

$$F_{НОВ} = F_{СТ} \times \frac{N_{П1СТ}}{N_{П1НОВ}} = 10{,}3 \times \frac{8{,}5}{17} = 5{,}15 \text{ мм}^2$$

Принимается число параллельных проводов $b_{НОВ}$ = 2, а число параллельных ветвей $a_{НОВ}$ = 2; тогда число элементарных проводов в пазе статора:

$$N_П = N_{П1НОВ} \times a \times b = 17 \times 2 \times 2 = 68$$

Сечение элементарного провода:

$$s_{1НОВ} = \frac{F_{НОВ}}{a_{НОВ} \times b_{НОВ}} = \frac{5{,}15}{2 \times 2} = 1{,}29 \text{ мм}^2$$

Принимается провод ПЭЛБО 1,25 *мм.*; $s_{1нов}$ = 1,23 *мм²*.
Пересчитывают величину сечения эффективного провода:

$$F_{НОВ} = s_{1НОВ} \times \text{a} \times b = 1{,}23 \times 2 \times 2 = 4{,}92 \text{ мм}^2$$

Мощность электродвигателя при n = 750 *об. мин.* без учета изменения *кпд* и *cosφ*:

$$P'_{НОВ} = P_{СТ} \times \frac{n_{НОВ}}{n_{СТ}} = 29 \times \frac{750}{1500} = 14{,}5 \text{ квт}$$

Учитывая ухудшение охлаждения при переходе на меньшую скорость вращения, мощность электродвигателя следует уменьшить на 10%:

$$P''_{НОВ} = 0{,}9 \times P'_{НОВ} = 0{,}9 \times 14{,}5 = 13 \text{ квт}$$

По приложению 6 находят *кпд* и *cosφ* для P = 29 *квт* и n = 1500 *об. мин.*, η = 0,87 и *cosφ* = 0,87, а для P = 13 *квт* и n = 750 *об. мин.* η = 0,83 и *cosφ* = 0,77.
Определяют мощность электродвигателя:

$$P_{НОВ} = 0{,}9 \times P_{СТ} \times \frac{n_{НОВ} \times \eta_{НОВ} \times cos\varphi_{НОВ}}{n_{СТ} \times \eta_{СТ} \times cos\varphi_{СТ}} = 0{,}9 \times 29 \times \frac{750 \times 0{,}83 \times 0{,}77}{1500 \times 0{,}87 \times 0{,}87} \approx 11 \text{квт}$$

Проверяют ток в обмотке статора:

$$I\text{ф}_{1\text{нов}} = \frac{P_{\text{нов}} \times 10^3}{3 \times U_{\text{ф}} \times \eta_{\text{нов}} \times cos\varphi_{\text{нов}}} = \frac{11 \times 10^3}{3 \times 220 \times 0{,}83 \times 0{,}77} = 25{,}9\ a$$

$$\Delta_{\text{нов}} = \frac{I\text{ф}_{1\text{нов}}}{F_{\text{нов}}} = \frac{25{,}9}{4{,}29} = 5{,}3\ \ a/\text{мм}^2$$

Максимальная индукция в воздушном зазоре при n = 750 *об. мин.*:

$$B_B = \frac{\text{С} \times 10^6}{D_B \times L \times N_{\text{Пнов}}} = \frac{63{,}6 \times 10^6}{22 \times 24{,}5 \times 17} = 7000\ \text{гс}$$

Магнитную индукцию в зубце статора не подсчитывают, так как при переходе с 1500 на 750 *об. мин.* она не изменится, ибо максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре не изменилась (уменьшили скорость вращения в 2 раза и увеличили число эффективных проводов в пазе тоже в 2 раза).
Обмотка статора двухслойная с шагом по пазам 1 – 5. В фазе четыре катушечные группы по одной катушке и четыре по две катушки в группе. Определяют число эффективных витков в фазе обмотки ротора при n = 750 *об. мин.*

Напряжение на кольцах ротора оставляют прежним, т. е.

$$U_{\text{лин2}} = 290\ \text{в} \qquad w_{2\text{нов}} = \frac{w_{1\text{нов}} \times U\text{ф}_2}{U\text{ф}_1}\ \text{витков}$$

Предварительно вычислим число эффективных витков в фазе обмотки статора:

$$w_{\text{нов}} = \frac{N_{\text{П1нов}} \times Z_1}{2 \times m_1} = \frac{N_{\text{П1нов}} \times Z_1}{6} = \frac{17 \times 36}{6} = 102\ \text{витка}$$

Число эффективных витков в фазе обмотки ротора:

$$w_{2\text{нов}} = \frac{102 \times 290}{220 \times \sqrt{3}} = 78\ \ \text{витков}$$

$$U\text{ф}_2 = \frac{U_{\text{лин2}}}{\sqrt{3}} \quad \text{так как обмотка соединена в Y.}$$

Число эффективных проводов в пазе ротора:

$$N_{\text{П2нов}} = \frac{2 \times m_2 \times w_{2\text{нов}}}{Z_2} = \frac{6 \times w_{2\text{нов}}}{Z_2} = \frac{6 \times 78}{48} = 9{,}75$$

Принимая $N_{\text{П2нов}}$ = 10, пересчитывают:
число эффективных витков в фазе обмотки ротора:

$$w_{2\text{нов}} = 78 \times \frac{10}{9{,}75} = 80$$

линейное напряжение на кольцах ротора:

$$U_{\text{лин2}} = 290 \times \frac{80}{78} = 297\ \text{в}$$

Определяют ток ротора:

$$I\text{ф}_{2\text{НОВ}} = (09 - 0{,}85) \times I\text{ф}_{1\text{НОВ}} \times \frac{w_{1\text{НОВ}}}{w_{2\text{НОВ}}} = 0{,}9 \times 25{,}9 \times \frac{102}{80} = 29{,}2\ a$$

Определяют сечение эффективного провода обмотки ротора при $N_{\text{П2НОВ}} = 10$:

$$F_{2\text{НОВ}} = F_{2\text{СТ}} \times \frac{N_{\text{П2СТ}}}{N_{\text{П2НОВ}}} = s_{1\text{СТ}} \times a_{\text{СТ}} \times b_{\text{СТ}} \times \frac{N_{\text{П2СТ}}}{N_{\text{П2НОВ}}} = 9{,}787 \times 1 \times 1 \times \frac{5}{10} = 4{,}89\ \text{мм}^2$$

Принимается провод ПБД 1,74 *мм*. (сечение $s_{1,2} = 2{,}378$ *мм*²); обмотку выполняют с двумя параллельными ветвями в один провод ($N_{2\text{НОВ}} = 2N_{\text{П2НОВ}}$).
Проверяют заполнение паза ротора вычислением коэффициента заполнения паза и сравнением его с общепринятыми величинами или практическим заполнением паза проводом диаметром 1,74 *мм*.
Определяют плотность тока в обмотке ротора:

$$\varDelta_{2\text{НОВ}} = \frac{I\text{ф}_{2\text{НОВ}}}{s_{1,2\text{НОВ}} \times a_{\text{НОВ}} \times b_{\text{НОВ}}} = \frac{29{,}2}{2{,}378 \times 1 \times 2} = 6{,}1\ \ a/\text{мм}^2$$

что находится в пределах допустимого.

Обмотку ротора выполняют катушечной с шагом по пазам 1 – 6 и 1 – 8 с четырьмя катушечными группами в фазе, а в катушечной группе по две катушки.
Вычисляют номинальный момент вращения на валу электродвигателя при старой и новой скоростях вращения:

$$M_{\text{СТ}} = 975 \times \frac{P_{\text{СТ}}}{n_{\text{СТ}}} = 975 \times \frac{29}{1500} = 18{,}8\ \text{кг} \times \text{м}$$

$$M_{\text{НОВ}} = 975 \times \frac{P_{\text{НОВ}}}{n_{\text{НОВ}}} = 975 \times \frac{12}{750} = 15{,}6\ \text{кг} \times \text{м}$$

Вычисляют, во сколько раз уменьшился номинальный вращающий момент при переходе на новую скорость вращения:

$$\frac{M_{\text{СТ}}}{M_{\text{НОВ}}} = \frac{18{,}8}{15{,}6} = 1{,}21\ \text{раза}$$

Пример. Требуется пересчитать на частоту 150 *гц* электродвигатель А31/4 0,6 *квт*, 220/380 *в*, 2,8/1,6 *а*, 50 *гц*, 1410 *об. мин.* Данные обмотки: $Z = 24$; $2p = 4$; число эффективных проводов в пазе $N_{\text{П}} = 118$; провод ПЭЛБО 0,57 *мм*. без параллельных ветвей и параллельных проводов. Число эффективных проводов в пазе:

$$N_{\text{ПНОВ}} = N_{\text{ПСТ}} \times \frac{f_{\text{СТ}}}{f_{\text{НОВ}}} = 118 \times \frac{50}{150} \approx 40$$

Сечение эффективного провода:

$$F_{\text{НОВ}} = F_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{НОВ}}}{f_{\text{СТ}}} = 0{,}255 \times \frac{150}{50} = 0{,}765\ \text{мм}^2$$

Берем провод ПЭЛБО сечением 0,724 *мм*², что соответствует 0,96 *мм*.
Мощность электродвигателя:

$$P_{\text{НОВ}} = P_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{НОВ}}}{f_{\text{СТ}}} = 0{,}6 \times \frac{150}{50} = 1{,}8\ \ \text{квт}$$

Ток при неизменных *кпд* и *cosφ*:

$$I_{\text{НОВ}} = I_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{НОВ}}}{f_{\text{СТ}}} = 1{,}6 \times \frac{150}{50} = 4{,}8\ a$$

вычислим плотность тока (для проверки правильности расчета):

$$\Delta = \frac{I_{\text{НОВ}}}{F_{\text{НОВ}}} = \frac{4{,}8}{0{,}765} = 6{,}27\ \text{а/мм}^2$$

Новая скорость вращения, синхронная:

$$n_{\text{НОВ}} = n_{\text{СТ}} \times \frac{f_{\text{НОВ}}}{f_{\text{СТ}}} = 1500 \times \frac{150}{50} = 4500 \quad \text{об. мин}$$

26. Замечания к расчетам.

После произведенного частичного ремонта или полной замены обмотки статора технические данные электродвигателя должны соответствовать данным обмоточно–расчетной карточки и, кроме того, отношение пускового и максимального моментов вращения к номинальному должно соответствовать ГОСТ. Поскольку измерение моментов вращения электродвигателей сопряжено с некоторыми трудностями, чаще всего о пригодности электродвигателя судят по величине тока холостого хода, который должен составлять определенный процент номинального тока для данной группы электродвигателей.

В табл. 12 (см. гл. 11) указаны допустимые величины тока холостого хода в процентах номинального в зависимости от мощности и скорости вращения электродвигателя. Иногда бывает, что хотя обмотка статора выполнена по правильно произведенному расчету, но при испытании ток холостого хода завышен. Такое явление может быть объяснено следующим:

Сердечник статора или ротора сдвинут с места, что уменьшает фактическую длину активной стали.

Активная сталь статора (ротора) или того и другого низкого качества. Для устранения этого дефекта обмотку статора следует перемотать с увеличением числа эффективных проводов в пазе при соответствующем снижении мощности.

Зазор между сердечником статора и сердечником ротора завышен из–за чрезмерной проточки ротора или длительного трения стали ротора о сталь статора. В таких случаях обмотку статора следует перемотать, увеличив число эффективных проводов в пазе, снизив при этом мощность. Бывают случаи, когда воздушный зазор так велик, что может возникнуть вопрос о целесообразности перемотки статора из–за резкого снижения cosφ и чрезмерного нагрева. В таких случаях, если его все же ремонтируют, при пересчете мощность электродвигателя должна быть соответственно снижена.

Таблица 12. Допустимые величины тока холостого хода электродвигателей в процентах номинального.

Мощность электродвигателя, *квт*	Скорость вращения электродвигателя *об. мин.*					
	3000	1500	1000	750	600	500
От 0,1 – до 0,5	60	75	85	90	95	–
0,51 – 1,0	50	70	75	80	85	90
1,1 – 5,0	45	65	70	75	80	85
5,1 – 10,0	40	60	65	70	75	80
10,1 – 25,0	30	55	60	65	70	75
25,1 –50,0	20	50	55	60	65	70
50,1 – 100	–	40	45	50	55	60

Глава девятая.

Соображения по расчетам обмоток и выбору фазосмещающих элементов асинхронных однофазных электродвигателей.
Пересчет обмотки статора с трехфазной системы на однофазную.

27. О методике и основных принципах расчета обмоток статора однофазных электродвигателей с фазосмещающими элементами.

При проектировании однофазных электродвигателей с фазосмещающими элементами расчет обмоток (рабочей, пусковой, конденсаторной) и фазосмещающего элемента (пусковой емкости, рабочей емкости, активного сопротивления) выполняют применительно к заданным условиям пуска и работы двигателя.

В числе требуемых условий могут быть:

а) получение максимального пускового момента;
б) получение заданной кратности пускового момента;
в) получение заданной кратности пускового тока;
г) оптимальный режим работы при номинальной нагрузке;
д) оптимальный режим работы при заданной нагрузке;
е) получение заданной кратности максимального вращающего момента.

Часто поставленные требования являются противоречивыми и при расчете однофазных электродвигателей удовлетворяются не полностью.
Сам расчет является трудоемким и сложным, что объясняется наличием двух обмоток, числа витков и параметры которых, включая параметры фазосмещающих элементов, должны быть в строго определенном соотношении и взаимно увязаны, чем и достигается осуществление заданных условий работы и пуска двигателя.
Поэтому при ремонте асинхронных однофазных электродвигателей рекомендуется выполнять обмотки по старым данным, сверив их с данными таблиц обмоточных данных для соответствующих электродвигателей.
Если изменились требуемые условия пуска или работы электродвигателя и требуется в ходе ремонта изменить обмоточные данные или данные фазосмещающего элемента, то при выборе новых обмоточных данных или фазосмещающего элемента следует иметь в виду следующие положения:
1. В двигателях с емкостью или активным сопротивлением в цепи пусковой обмотки вращающий момент, скольжение, максимальный вращающий момент, *кпд* и коэффициент мощности зависят только от данных рабочей обмотки, а пусковой момент и кратность пускового тока – от параметров обеих обмоток.

В конденсаторных двигателях эксплуатационные и пусковые характеристики зависят от обеих обмоток.
2. Пусковой момент в двигателях с пусковой емкостью можно увеличить одним из следующих способов:
а) увеличивая емкость конденсатора;
б) увеличивая сопротивление ротора путем проточки короткозамыкающих колец (или – в условиях электромашиностроительных заводов – перезаливкой беличьей клетки алюминиевым сплавом с повышенным сопротивлением;
в) увеличивая число витков пусковой обмотки.

Пусковой ток в двигателях с пусковой емкостью можно уменьшить:
а) увеличивая сопротивление ротора;
б) увеличивая число витков пусковой обмотки, уменьшив при этом емкость конденсатора.
Однако следует помнить, что с увеличением сопротивления ротора у электродвигателя с пусковой емкостью перегрузочная способность последнего (т. е. отношение максимального момента вращения к номинальному) уменьшается, а скольжение, соответствующее максимальному моменту, увеличивается. В конденсаторных электродвигателях максимальный момент вращения почти не зависит от величины активного сопротивления ротора.
3. В электродвигателях с вынесенным или встроенным пусковым сопротивлением отношение числа эффективных витков пусковой обмотки к числу эффективных витков рабочей обмотки (так называемый коэффициент трансформации) принимается обычно меньшим единицы. Например, в двигателях единой серии со встроенным пусковым сопротивлением типа АОЛБ коэффициент трансформации находится в пределах 0,23 – 0,83, увеличиваясь по мере увеличения мощности электродвигателя. Однако при значительном уменьшении коэффициента трансформаций пусковой ток может выйти за пределы допустимой величины. В электродвигателях типа АОЛГ (с пусковой емкостью) коэффициент трансформации находится в пределах 0,8 – 1,45.

В литературе по расчетам микродвигателей числом эффективных витков принято называть произведение числа витков в фазе обмотки статора на обмоточный коэффициент (эффективное число витков равно $w_1 \times kw$).

В конденсаторных электродвигателях коэффициент трансформации может значительно отклоняться от единицы в ту или другую сторону.
При коэффициенте трансформации, равном единице, сечение провода рабочей и конденсаторной обмоток одинаково, а при отклонении от единицы сечения провода рабочей и конденсаторной обмоток должны быть обратно пропорциональны числам витков их, чем достигается примерно одинаковая плотность тока в обеих обмотках.
4. У электродвигателей с фазосмещающими элементами в цепи пусковой обмотки (емкость, активное сопротивление) сечение провода пусковой обмотки выбирается обычно меньшим, чем сечение провода рабочей обмотки, так как плотность тока в пусковой обмотке можно допустить большей (в 3 – 4 раза).
У этих же электродвигателей ток холостого хода может составлять 80 – 95% номинального. Если ток холостого хода приближается к величине номинального тока или превышает ее, то следует уменьшить индукцию в воздушном зазоре B_B, увеличив соответственно число витков рабочей обмотки и уменьшив при необходимости сечение эффективного провода.

5. При расчетах однофазных электродвигателей большое значение имеет правильный выбор электромагнитных нагрузок: максимальной индукции в воздушном зазоре B_B, плотности тока Δ и линейной нагрузки A.

Линейной нагрузкой называется число ампер–проводов, приходящихся на 1 *см*. длины внутренней окружности (расточки) статора, *а/см.*:

$$A = \frac{2 \times w\text{ф} \times I_{\text{Н}}}{\pi \times D_B}$$

Для однофазного электродвигателя с пусковым элементом линейная нагрузка определяется как отношение ампер–проводов рабочей обмотки к длине той части окружности, на которой расположены пазы, занимаемые этой обмоткой:

$$A = \frac{2 \times w\text{ф}_A \times I_A}{\alpha_{ZA}} \quad (42)$$

где: α_{ZA} – длина дуги окружности, занимаемой пазами рабочей обмотки.

В современных однофазных электродвигателях линейная нагрузка обычно составляет:

при $2p = 2$ A = 105–125 (редко – до 150) *а/см*.
при $2p = 4$ A = 120–165 (редко – до 200) *а/см*.

Плотность тока рабочей обмотки берется в пределах 4 – 8 *а/мм*^{2}. Нижний предел берется для более мощных и более тихоходных электродвигателей с худшими условиями охлаждения. Магнитная индукция может находиться в пределах 3000 – 8000 *гс*. Нижний предел относится к электродвигателям меньшей мощности и при требовании малошумности электродвигателя. Для однофазных электродвигателей единой серии индукции приняты следующие:

при $2p = 2$ $B_B = 4500 \div 5500$ *гс*
при $2p = 4$ $B_B = 6000 \div 7500$ *гс*

меньшие значения магнитной индукции относятся к электродвигателям меньшей мощности.
6. Правильность принятого значения магнитной индукции в воздушном зазоре проверяется вычислением магнитной индукции в зубце Bz и спинке статора Ba.

$$Bz = B_B \times \frac{t_1}{bz \times kc} \quad (43)$$

где: t_1 – зубцовое деление статора:

$$t_1 = \frac{\pi \times D_B}{Z} \quad (44)$$

bz – расчетная ширина зубца; kc – коэффициент заполнения пакета статора сталью. При толщине стали 0,5 *мм*. и оксидировании листов kc = 0,95, при лакировке листов kc = 0,93.

Индукция в спинке статора определяется по формуле:

$$Ba = \frac{\Phi}{2 \times hc \times L \times kc} \quad (45)$$

где: hc – высота спинки статора; Ф – магнитный поток (см. п. 47).

В современных однофазных электродвигателях принимается:

$$Bz = 14000 \div 20000 \text{ гс}$$
$$Ba = 12000 \div 19000 \text{ гс}$$

индукция *Ba* принимается тем большей, чем меньше число полюсов.

В двигателях небольшой мощности индукции *Bz* и *Ba* принимаются ближе к меньшему пределу. Для малошумных однофазных электродвигателей принимается: *Bz* – не более 13000 *гс*, а *Ba* – не более 10000 *гс*.
7. Число витков в фазе рабочей обмотки статора однофазного электродвигателя определяется по общей для микродвигателей формуле:

$$w_{ФA} = \frac{U_{Н} \times ke \times 10^{8}}{4{,}44 \times f \times Ф \times kw} \quad (46)$$

где: *ke* – коэффициент, учитывающий падение напряжения в обмотке статора:

$$ke = \frac{E_{Н}}{U_{Н}} = 0{,}7 \div 0{,}9$$

Меньшая величина *ke* берется для электродвигателей меньшей мощности. Формулы, которыми пользуются для вычисления обмоточных коэффициентов *kw*, из–за их сложности не приводятся. Ниже приводятся обмоточные коэффициенты для некоторых видов однослойных и двухслойных обмоток однофазных электродвигателей с пусковыми элементами (табл. 7).

Магнитный поток определяется по формуле:

$$Ф = \alpha \times \tau \times L \times B_{B} \quad \text{мкс} \quad (47)$$

где: α – коэффициент магнитного перекрытия. Принимают α ≈ 0,66 – 0,73. L – длина активной стали статора без вентиляционных каналов.
Число эффективных витков в пазе у однофазных двигателей, если рабочая обмотка занимает ⅔ пазов, определяют по формуле:

$$N_{П} = \frac{3 \times w_{1}}{Z} \quad (48)$$

Сечение эффективного провода определяют по формуле:

$$F = \frac{I_{Н}}{\Delta} \quad \text{мм}^{2}$$

8. С достаточной для практики точностью емкость рабочего конденсатора для однофазного электродвигателя современной конструкции можно выбрать, пользуясь формулой:

$$C \approx (2100 \div 2300) \times \frac{P_{Н}}{U^{2}} \quad \text{мкф}$$

где: $P_{Н}$ – номинальная мощность электродвигателя, *вт*; U – напряжение электродвигателя, *в*.

Вычисленная по приведенной выше формуле емкость рабочего конденсатора будет обеспечивать оптимальный режим работы электродвигателя при нагрузке, близкой к номинальной. Пусковой момент при этом будет составлять (0,2 ÷ 0,4) $M_{\text{Н}}$.

Напряжение конденсатора должно быть равно 1,3 ÷ 1,6 × U, где U – напряжение электродвигателя. При работе электродвигателя с недогрузкой напряжение конденсатора берется ближе к высшему пределу.

Если требуется обеспечить заданную кратность пускового момента в конденсаторном электродвигателе или электродвигателе с пусковой емкостью, то часто приемлемая величина емкости рабочего или пускового конденсатора подбирается опытным путем. Опытным путем можно подобрать также необходимое активное сопротивление для пуска однофазного электродвигателя с пусковой обмоткой при заданной кратности пускового момента. Во время опыта следует использовать ползунковый реостат соответствующего сопротивления.

Таблица 7.

Вид обмотки	Число пазов статора	Число полюсов $2p$	Число пазов рабочей обмотки Z_A	Число пазов пусковой обмотки Z_B	Шаг обмотки y	Число пазов на полюс	Обмоточный коэффициент
Однослойная рабочая	18	2	12	6	диаметральный	6	0,830
Однослойная пусковая					диаметральный	3	0,956
Однослойная рабочая	24	2	16	8	диаметральный	8	0,826
Однослойная пусковая					диаметральный	4	0,953
Однослойная рабочая	24	4	16	8	диаметральный	4	0,834
Однослойная пусковая					диаметральный	2	0,965
Однослойная рабочая	36	4	24	12	диаметральный	6	0,830
Однослойная пусковая					диаметральный	3	0,956
Двухслойная рабочая	18	2	12	6	6	6	0,719
Двухслойная пусковая					6	3	0,830
Двухслойная рабочая	24	2	16	8	8	8	0,716
Двухслойная пусковая					8	4	0,829
Двухслойная рабочая	24	4	16	8	4	4	0,726
Двухслойная пусковая					4	2	0,837
Двухслойная рабочая	36	4	24	12	6	6	0,719
Двухслойная пусковая					6	3	0,830

9. При включении трехфазных электродвигателей по схеме однофазных рабочую емкость для режима номинальной нагрузки можно подобрать, пользуясь следующими выведенными из практики соотношениями:

при включении электродвигателя по схеме *ж*, рис. 29:

$$C_{\text{Р}} \approx 2800 \times \frac{I_{\text{Н}}}{U} \quad \text{мкф}$$

при включении электродвигателя по схеме *з*, рис. 29:

$$C_{\text{Р}} \approx 4800 \times \frac{I_{\text{Н}}}{U} \quad \text{мкф}$$

при включении электродвигателя по схеме *е*, рис. 29:

$$C_{\text{Р}} \approx 2740 \times \frac{I_{\text{Н}}}{U} \quad \text{мкф}$$

где: $C_{\text{Р}}$ – емкость рабочего конденсатора, соответствующая оптимальным рабочим характеристикам при номинальной нагрузке; $I_{\text{Н}}$ и U – номинальный ток и номинальное напряжение. Номинальным током и номинальным напряжением в данном случае называют фазные значения этих величин, указанные в паспорте. Например, при 17=220/380 *в* и I = 3,8/2,2 *а*, если двигатель включен по схеме *ж* или *е* (рис. 29), фазные значения будут 220 *в* и 2,2 *а*.

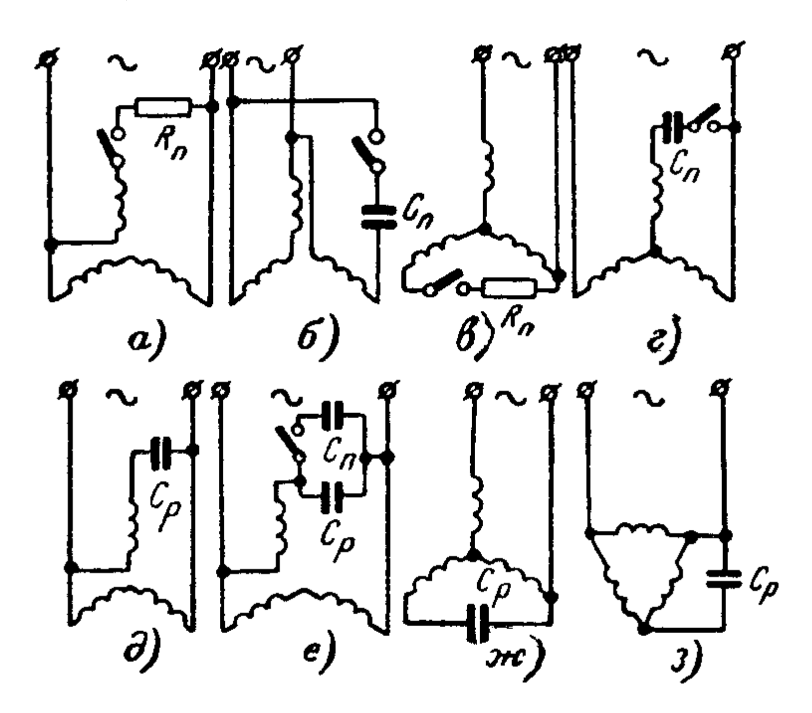


Рис. 29. Схема включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.

Если подобранная рабочая емкость не обеспечивает требуемого пускового момента, то дополнительно подбирают пусковую емкость опытным путем.

10. Если однофазный электродвигатель, пересчитанный из трехфазного, не достигает нормальной скорости вращения, а застревает на низшей скорости, что может быть при однослойной обмотке статора и отсутствии скоса пазов ротора, то следует увеличить сопротивление клетки ротора проточкой короткозамыкающих колец, а также увеличить воздушный зазор (шлифовкой ротора) на 15 – 20%.

28. Поверочный расчет обмотки статора однофазного электродвигателя со встроенным пусковым сопротивлением.

Последовательность поверочного расчета рассмотрим на примере.

Требуется определить электромагнитные нагрузки и коэффициент трансформации электродвигателя АОЛБ 32/4.

Данные электродвигателя и обмотки:

Мощность на валу P = 0,4 *квт*. Напряжение U = 220 *в*
Ток I = 4,4 *а*. Скорость вращения n = 1440 *об. мин.* ($2p$ = 4)
Внутренний диаметр статора D_B = 89 *мм*.
Длина пакета статора L = 85 *мм*.
Ширина зубца (расчетная) пакета статора bz = 6 *мм*.
Высота спинки пакета статора hc = 12,7 *мм*.
Число пазов статора Z = 24. Число пазов, занимаемое рабочей обмоткой Z_A = 16
Число пазов, занимаемое пусковой обмоткой Z_B = 8

Рабочая обмотка: Число эффективных проводов в обмотке $w\text{ф}_\text{А}$ = 864
Число эффективных проводов в пазе $N_{\text{ПА}}$ = 54
Марка и диаметр провода ПЭВ–2 0,9 *мм*.

Пусковая обмотка: Число эффективных проводов в обмотке $N_{\text{ПВ}}$ = 52 ($w\text{ф}_B$ = 416)
Число эффективных проводов в пазе включая бифилярную катушку $N_{\text{ПВ}}$ = 108
Марка провода ПЭЛШКО, диаметр провода 0,59 *мм*.

а) Вычислим линейную нагрузку:

$$A = \frac{2 \times w\phi_A \times I_\text{А}}{\alpha_{ZA}} = \frac{w\phi_A \times I_A}{\frac{\pi \times D_B}{Z} \times Z_A} = \frac{864 \times 4{,}4}{\frac{3{,}14 \times 8{,}9}{24} \times 16} = \frac{864 \times 4{,}4}{18{,}6} = 204 \text{ ампер} - \text{проводов}$$

б) Плотность тока рабочей обмотки:

$$\varDelta = \frac{I_\text{Н}}{F} = \frac{4{,}4}{0{,}636} = 6{,}9\ a/\text{мм}^2$$

в) Магнитный поток:

$$\Phi = \frac{U_\text{Н} \times ke \times 10^8}{4{,}44 \times f \times \frac{w\phi_A}{p} \times kw} = \frac{220 \times 0{,}8 \times 10^8}{4{,}44 \times 50 \times \frac{864}{2} \times 0{,}835} = 0{,}219 \times 10^6 \text{ мкс}$$

г) Магнитная индукция в воздушном зазоре:

$$B_B = \frac{\Phi}{\alpha \times \tau \times L} = \frac{0{,}219 \times 10^6}{0{,}7 \times \frac{\pi \times D_B}{2p} \times 8{,}5} = \frac{4 \times 0{,}219 \times 10^6}{0{,}7 \times \pi \times 8{,}9 \times 8{,}5} = 5270 \text{ гс}$$

д) Магнитная индукция в зубце:

$$Bz = B_B \times \frac{t_1}{bz \times kc} = B_\text{В} \times \frac{\frac{\pi \times D_B}{Z}}{bz \times kc} = 5270 \times \frac{\frac{3{,}14 \times 8{,}9}{24}}{0{,}6 \times 0{,}93} = 11000 \text{ гс}$$

е) Магнитная индукция в спинке:

$$Ba = \frac{\Phi}{2 \times hc \times L \times kc} = \frac{0{,}219 \times 10^6}{2 \times 1{,}27 \times 8{,}5 \times 0{,}93} = 10900 \text{ гс}$$

ж) Коэффициент трансформации:

$$k = \frac{w_{ЭВ}}{w_{ЭА}} = \frac{kw_B \times w\phi_B}{kw_А \times w\phi_А} = \frac{0{,}965 \times 416}{0{,}834 \times 864} = 0{,}557$$

Следовательно, плотность тока и магнитные нагрузки находится в пределах допустимых величин; по магнитным нагрузкам двигатель немного недогружен.

29. Поверочный расчет обмотки статора однофазного электродвигателя с расщепленными полюсами.

Методика расчета однофазных электродвигателей с расщепленными полюсами является пока еще приближенной. Однако для поверочных расчетов она является вполне приемлемой. Данными для поверочного расчета являются:
а) Геометрические размеры сердечника статора и полюса:

Диаметр расточки D_B, *см*.
Длина пакета статора L, *см*.
Осевая длина полюса $L_{ПЛ} = L$, *см*.
Ширина сердечника полюса $b_{ПЛ}$, *см*.
Ширина сердечника (спинки) h_C, *см*.

б) Данные обмотки:
Число витков обмотки, приходящееся на полюс $w_{ПЛ}$
Число полюсов $2p$
Число параллельных ветвей a
Число параллельных проводов b
Марка и диаметр обмоточного провода

в) Технические данные электродвигателя:
Полезная мощность на валу P, *вт*
Напряжение питающей сети U, *в*
Ток I, *а*
Частота сети f, *гц*
Синхронная скорость вращения n, *об. мин.*

Число витков обмотки на один полюс вычисляется по формуле:

$$w_{ПЛ} = \frac{E_1 \times 10^8}{2p \times 4{,}44 \times f_1 \times \Phi} \quad (49) \quad \text{где: } E_1 = ke \times U = (0{,}8 \div 0{,}94) \times U$$

Ф – магнитный поток:

$$\Phi = B_B \times b_0 \times L \quad (50) \quad \text{где: } b_0 - \text{ расчетная полюсная дуга}$$

$b_0 = \alpha \times \tau = (0{,}6 \div 0{,}9) \times \tau$, *см.*;

$$\tau = \frac{\pi \times D_B}{2p} \text{ см.}$$

Максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре B_B принимается в пределах 4000 – 6000 *гс*. Нижний предел относится к менее мощным электродвигателям и с меньшим числом полюсов ($2p = 2$), а верхний – к более мощным электродвигателям и с большим числом полюсов ($2p = 4$ и более).
Сечение эффективного провода:

$$F = \frac{I_1}{\Delta_1} \quad \text{мм}^2$$

где $\Delta_1 \approx 3 \div 5$ *а/мм²*.
В однофазных электродвигателях ток I_1 определяется при известной полезной мощности по формуле:

$$I_1 = \frac{P}{U_1 \times \eta \times cos\varphi} \quad a \qquad (51)$$

Индукция в сердечнике полюса определяется по формуле:

$$B_{\text{ПЛ}} = \frac{\Phi \times \sigma}{S_{\text{ПЛ}}} = \frac{\Phi \times \sigma}{L_{\text{ПЛ}} \times b_{\text{ПЛ}} \times k_{\text{С}}} \quad \text{гс} \qquad (52)$$

где: σ – коэффициент магнитного рассеяния обмотки статора, $\sigma = 1,1 \div 1,16$, $k_{\text{с}}$ – коэффициент заполнения сердечника полюса сталью, $k_{\text{с}} = 0,93 \div 0,95$.

Величина индукции в сердечнике полюса $B_{\text{ПЛ}}$ принимается в пределах 8000 – 10000 *гс*.
Индукция в сердечнике (спинке) статора определяется по формуле:

$$Ba = \frac{\Phi \times \sigma}{2 \times hc \times L \times kc} \qquad (53)$$

Величина индукции в спинке статора Ba принимается в пределах 8000 – 10000 *гс*.

Пример.
Проверить соответствие числа витков и сечения провода в электродвигателе для кокономотальных автоматов, а также пересчитать электродвигатель на напряжение 220 *в*.

Технические данные электродвигателя:
Полезная мощность $P = 5$ *вт*
Напряжение $U = 36$ *в*
Ток $I = 0,9$ *а*
Частота $f = 50$ *гц*
Синхронная скорость вращения $n = 1500$ *об. мин.*

Геометрические размеры статора:
Диаметр расточки $D_B = 43$ *мм*.
Длина пакета статора $L = 34$ *мм*.
Осевая длина полюса $L_{\text{ПЛ}} = L = 34$ *мм*.
Ширина сердечника полюса $b_{\text{пл}} = 24$ *мм*.
Ширина спинки статора $hc = 5$ *мм*.

Данные обмотки:
Число витков обмотки, приходящееся на полюс $w'_{\text{ПЛ}} = 300$
Число полюсов $2p = 4$
Число параллельных ветвей $a = 2$
Провод ПЭВ–2 0,35 *мм*., сечение 0,0962 *мм²*.

Число эффективных витков обмотки, приходящееся на полюс:

$$w_{\text{ПЛ}} = \frac{w'_{\text{ПЛ}}}{a} = \frac{300}{2} = 150$$

Определяем магнитный поток:

$$\Phi = \frac{E_1 \times 10^8}{2p \times 4{,}44 \times f \times w_{\text{ПЛ}}} = \frac{0{,}85 \times 36 \times 10^8}{4 \times 4{,}44 \times 50 \times 150} = 2{,}29 \times 10^4 \quad \text{мкс}$$

Магнитная индукция в воздушном зазоре:

$$B_B = \frac{\Phi}{b_0 \times L} = \frac{\Phi}{\alpha \times \tau \times L} = \frac{2{,}29 \times 10^4}{0{,}75 \times \frac{\pi \times 4{,}3 \times 3{,}4}{4}} = 2670 \quad \text{гс}$$

Индукция в сердечнике полюса:

$$B_{\text{ПЛ}} = \frac{\Phi \times \sigma}{L_{\text{ПЛ}} \times b_{\text{ПЛ}} \times kc} = \frac{2{,}29 \times 10^4 \times 1{,}12}{3{,}4 \times 2{,}4 \times 0{,}93} = 3350 \quad \text{гс}$$

Индукция в спинке статора:

$$Bc = \frac{\Phi \times \sigma}{2 \times hc \times L \times kc} = \frac{2{,}29 \times 10^4 \times 1{,}12}{2 \times 0{,}5 \times 3{,}4 \times 0{,}93} = 8100 \text{ гс}$$

Плотность тока:

$$\Delta = \frac{I}{s_1 \times a} = \frac{0{,}9}{0{,}0962 \times 2} = 4{,}65 \quad \text{а/мм}^2$$

Из поверочного расчета (видно, что сердечник полюса недогружен, а сердечник статора (спинка) имеет предельную магнитную нагрузку для данной мощности электродвигателя. Плотность тока приближается к верхнему пределу.

Пересчитаем обмотку на напряжение 220 *в* и выполним ее без параллельных ветвей.

Число витков на полюс при напряжении 220 *в*:

$$w_{\text{ПЛНОВ}} = w_{\text{ПЛСТ}} \times \frac{U_{\text{НОВ}}}{U_{\text{СТ}}} = 150 \times \frac{220}{36} = 917$$

Принимаем $w_{\text{ПЛНОВ}} = 920$.

Сечение эффективного провода:

$$F'_{\text{НОВ}} = F_{\text{ст}} \times \frac{U_{\text{СТ}}}{U_{\text{НОВ}}} = s_1 \times a \times \frac{U_{\text{СТ}}}{U_{\text{НОВ}}} = 0{,}0962 \times 2 \times \frac{36}{220} = 0{,}0314 \quad \text{мм}^2$$

Сечению 0,0314 *мм*² соответствует диаметр 0,20 *мм*., однако, учитывая уменьшение коэффициента заполнения паза медью при переходе на меньшие сечения провода, берем 0,18 *мм*.; тогда сечение:

$$F_{\text{НОВ}} = 0{,}0254 \text{ мм}^2$$

Пересчитаем плотность тока:

$$\Delta_{\text{НОВ}} = \Delta_{\text{СТ}} \times \frac{F'_{\text{НОВ}}}{F_{\text{НОВ}}} = 4{,}65 \times \frac{0{,}0314}{0{,}0254} = 5{,}73 \;\; a/\text{мм}^2$$

что можно допустить.

Ток при $U_{\text{НОВ}}$ = 220 *в*:

$$I = s_{1\text{НОВ}} \times \Delta_{\text{НОВ}} = 0{,}0254 \times 5{,}73 = 0{,}141 \quad a$$

Произведение *кпд* на *cosφ* в процентах:

$$\eta \times cos\varphi = \frac{P}{U \times I} = \frac{5 \times 100\%}{220 \times 0{,}141} = 16\%$$

30. Пересчет обмотки статора электродвигателя с трехфазной системы на однофазную.

Пересчет обмотки с трехфазной системы на однофазную облегчается тем, что при неизменной скорости вращения отпадает необходимость в подсчете магнитных нагрузок – индукции в воздушном зазоре, зубце и спинке статора. Для небольших электродвигателей магнитные нагрузки оставляют прежними, а для средних увеличивают их на 10–15%, соответственно уменьшая полученное методом пересчета число эффективных витков и увеличивая сечение эффективного провода. Если заданное напряжение однофазного электродвигателя соответствует фазному напряжению трехфазного электродвигателя, то число эффективных витков рабочей обмотки однофазного электродвигателя принимается равным числу витков фазы трехфазного электродвигателя ($w_{\Phi\text{IA}} = w_{\text{III}}$).

Если напряжение однофазного электродвигателя отличается от фазного напряжения трехфазного электродвигателя, то пересчет числа витков производится по формуле:

$$w\phi_{IA} = w\phi_{III} \times \frac{U_I}{U\phi_{III}} \quad (54)$$

где: $w\phi_{\text{IA}}$ – число эффективных витков рабочей обмотки однофазного электродвигателя; $w\phi_{\text{III}}$ – число эффективных витков фазы обмотки трехфазного электродвигателя;
U_{I} – напряжение однофазного электродвигателя;
$U\phi_{\text{III}}$ – фазное напряжение трехфазного электродвигателя.
При подсчете числа эффективных проводов в пазе необходимо брать то число пазов, которое занимает рабочая обмотка. В однофазных двигателях с пусковыми элементами рабочая обмотка занимает ⅔ пазов.
Число эффективных проводов в пазе рабочей обмотки вычисляется по формуле:

$$N_{\text{ПА}} = \frac{2 \times w\phi_{\text{А}}}{Z_A} \quad (55)$$

где $Z_{\text{А}}$ – число пазов, занимаемое рабочей обмоткой.
Сечение эффективного провода рабочей обмотки вычисляется по формуле:

$$F_A = F_{III} \times \frac{N_{\text{П}III}}{N_{\text{ПА}}} \quad (56)$$

где: $F_{\text{А}}$ – сечение эффективного провода рабочей обмотки;
F_{III} – сечение эффективного провода обмотки трехфазного электродвигателя;
$N_{\text{ПА}}$ – число эффективных проводов в пазе рабочей обмотки;
$N_{\text{ПIII}}$ – число эффективных проводов в пазе обмотки трехфазного электродвигателя.

Число эффективных проводов в пазе пусковой обмотки принимается в 2 раза бóльшим, а сечение провода в 2 раза меньшим, чем рабочей обмотки:

$$N_{\text{ПВ}} = 2 \times N_{\text{ПА}} \quad F_B = 0{,}5 \times F_A$$

Ток однофазного электродвигателя определяют по вычисленному сечению для рабочей обмотки и плотности тока в обмотке трехфазного электродвигателя:

$$I_1 = F_A \times \Delta_{III}; \quad \Delta_{III} = \frac{I\Phi_{III}}{F_{III}}$$

При числе параллельных ветвей a = 1 и числе параллельных проводов b = 1 сечение эффективного провода $F_А$ равно сечению элементарного провода s_1.

Мощность однофазного электродвигателя определяется по формуле:

$$P_1 = U \times I_1 \times cos\varphi \times \eta \quad (57)$$

Подсчитанные произведения *кпд* на *cos*φ можно брать из табл. 8.

Таблица 8. Произведения *кпд* на *cosφ* для однофазных асинхронных двигателей с пусковыми элементами.

Мощность электродвигателя *вт*	*η×cosφ* при 2*p* = 2	*η×cosφ* при 2*p* = 4	Мощность электродвигателя *вт*	*η×cosφ* при 2*p* = 2	*η×cosφ* при 2*p* = 4
25	0,29	0,18	250	0,47	0,39
50	0,315	0,22	300	0,49	0,415
75	0,34	0,26	350	0,505	0,435
100	0,365	0,295	400	0,52	0,45
150	0,42	0,33	450	0,53	0,46
200	0,45	0,36	500	0,53	0,46

При мощности электродвигателя свыше 0,5 *квт* значения *η* и *cosφ* можно брать по приложению 6 (для трехфазного электродвигателя), снизив мощность полученную по формуле (57), на 10–15%.

Пример. Пересчитать с трехфазной системы на однофазную обмотку статора электродвигателя типа ПА–22–2: мощность 0,125 *квт*, напряжение 220/380 *в*, ток 0,7/0,41 *а*, синхронная скорость вращения 3000 *об. мин.*, соединение Δ/Y.

Данные обмотки трехфазного электродвигателя:

Число эффективных проводов в пазе $N_{ПIII}$ = 270
Число пазов статора Z = 18
Провод марки ПЭВ–2 0,35 *мм.*, сечение $s_1 = F$ = 0,0962 *мм*²
Обмотка однослойная, шаг y = 1 – 8.

Заданное напряжение однофазного электродвигателя 220 *в*. Рабочая обмотка занимает ⅔ пазов, а пусковая ⅓ пазов ($Z_А$ = 12; $Z_В$ = 6). Обмотку выполняем двухслойной с укорочением шага на ⅓ (см. рис. 63), где:

$y_А = y_В = 6$; $q_А = 6$; $q_В = 3$.

Определяем число эффективных витков рабочей обмотки однофазного электродвигателя:

$$w_{IA} = w_{III} = \frac{N_{ПIIIZ}}{2 \times m} = \frac{270 \times 18}{2 \times 3} = 815$$

Число эффективных проводов в пазе рабочей обмотки:

$$N_{\text{П}A} = \frac{2 \times w_{IA}}{Z_A} = \frac{2 \times 815}{12} = 136$$

Сечение эффективного провода рабочей обмотки:

$$F_A = F_{III} \times \frac{N_{\text{П}III}}{N_{\text{П}A}} = 0{,}0962 \times \frac{270}{136} = 0{,}192 \quad \text{мм}^2$$

Берем провод ПЭВ–2 0,49 *мм.*; s_1 = 0,188 *мм*². Число эффективных проводов пусковой обмотки:

$$N_{\text{ПВ}} = 2 \times N_{\text{П}A} = 2 \times 136 = 272$$

Сечение эффективного провода пусковой обмотки:

$$F_B = 0{,}5 \times F_A = 0{,}5 \times 0{,}188 = 0{,}0943 \text{ мм}^2$$

Берем провод ПЭВ–2 0,35 *мм*. Определяем плотность тока в обмотке трехфазного электродвигателя:

$$\Delta_{III} = \frac{I\phi_{III}}{F_{III}} = \frac{0{,}41}{0{,}0962} = 4{,}26 \quad \text{а/мм}^2$$

Ток однофазного электродвигателя при $\Delta_I = \Delta_{III}$:

$$I_I = F_A \times \Delta_{III} = s_{1A} \times \Delta_{III} = 0{,}192 \times 4{,}26 = 0{,}82 \quad a$$

Мощность однофазного электродвигателя:

$$P_1 = U \times I_I \times cos\varphi \times \eta = 220 \times 0{,}82 \times 0{,}33 = 59{,}5 \approx 60 \quad \text{вт}$$

Здесь η × cosφ взято из табл. 8 примерно для мощности 0,5 × P_{III} = 0,5 × 125 = 62,5 *вт*. Так как расхождение между мощностью, по которой подбирали η × *cosφ* по табл. 8, и мощностью, полученной расчетом для однофазного электродвигателя, незначительно, то пересчета мощности не производим.

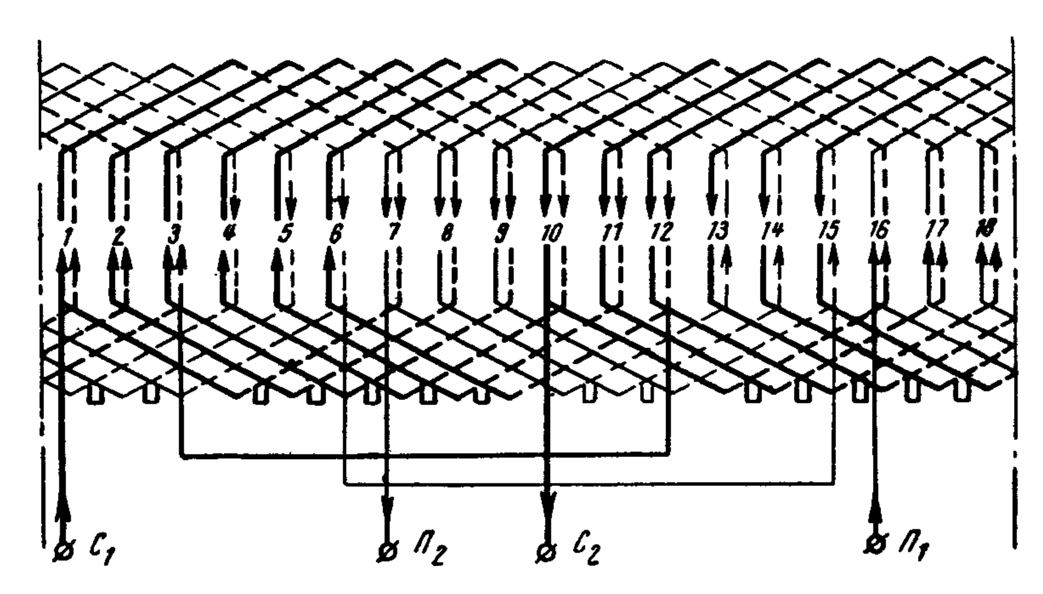


Рис. 63. Схема двухслойной обмотки однофазного электродвигателя с пусковым элементом Z = 18, $2p$ = 2, q_A = 6, $y_A = y_B$ = 6.

Приложение 5.

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронных трехфазных электродвигателей защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором мощностью до 100 *квт* (по ГОСТ 186–52).

Мощность, *квт*,	*кпд η*, %				*cosφ*			
	Скорость вращения (синхронная) *об. мин.*,							
	3000	1500	1000	750	3000	1500	1000	750
0,6	–	74,0	–	–	–	0,76	–	–
1,0	79,0	78,5	77,0	–	0,86	0,79	0,72	–
1,7	81,5	81,5	79,5	–	0,87	0,82	0,75	–
2,8	84,0	83,5	82,5	–	0,88	0,84	0,78	–
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90,0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83
40	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84
75	91,0	91,5	92,0	–	0,91	0,89	0,88	–
100	91,5	92,0	–	–	0,92	0,89	–	–

Приложение 6.

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности асинхронных трехфазных электродвигателей защищенного исполнения с фазным ротором мощностью до 100 *квт* (по ГОСТ 186–52).

Мощность, *квт*	*кпд η*, %			*cosφ*		
	Скорость вращения (синхронная), *об. мин.*					
	1500	1000	750	1500	1000	750
1,7	–	72,5	–	–	0,72	–
2,8	78,0	75,5	–	0,82	0,74	–
4,5	80,0	78,5	76,5	0,83	0,76	0,72
7	82,0	81,0	79,5	0,84	0,78	0,74
10	83,5	82,5	81,5	0,85	0,79	0,76
14	84,5	84,0	83,0	0,86	0,80	0,77
20	86,0	85,0	84,5	0,86	0,81	0,79
28	87.0	86,5	86,0	0,87	0,82	0,80
40	88,0	87,5	87,5	0,87	0,83	0,81
55	89,0	88,5	88,5	0,87	0,83	0,82
75	90,0	89,5	–	0,88	0,84	–
100	90,5	–	–	0,88	–	–

Приложение 7. Таблица замены одного круглого провода двумя проводами, эквивалентными по суммарному сечению.

При замене провода, диаметр которого указан в верхнем горизонтальном ряду, двумя другими один берется из вертикального столбца под данным диаметром, второй – по горизонтали влево от него в первом вертикальном столбце, Например, провод 1,25 заменяется проводами 1,16 + 0,47 или 1,12 + 0,55, или 1,08 + 0,62 и т. д.

	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,56	1,62	1,68	1,74	1,81	1,88	1,95
0,44	0,90	–	–	–	1,08	1,12	–	–	–	–	–	–	1,50	1,56	1,62	1,68	–	–	
0,47	–	0,93	–	–	–	–	1,16	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
0,49	–	–	0,96	–	–	–	–	1,20	–	–	–	–	–	–	–	–	1,74	–	
0,51	0,86	0,90	–	1,00	1,04	1,08	–	–	1,25	1,30	–	–	–	–	–	–	–	1,81	1,88
0,53	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,35	1,40	–	–	–	–	–	–	–
0,55	0,83	–	0,93	–	–	–	1,12	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,57	–	–	–	0,96	–	–	–	1,16	–	–	–	–	1,45	–	–	–	–	–	–
0,59	0,80	0,86	0,90	–	1,00	1,04	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,62	–	0,83	–	0,93	–	–	1,08	–	1,20	1,25	–	–	–	1,50	1,56	–	–	–	–
0,64	0,77	–	0,86	–	0,96	–	–	1,12	–	–	1,30	1,35	–	–	–	1,62	–	–	–
0,67	–	0,80	–	0,90	–	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,68	–	–
0,69	0,72	0,77	0,83	–	0,93	–	1,04	–	1,16	–	–	–	1,40	–	–	–	–	–	–
0,72	0,69	0,74	0,80	0,86	–	0,96	–	1,08	–	1,20	–	–	–	1,45	–	–	–	1,74	1,81
0,74	–	0,72	–	0,83	0,90	–	1,00	–	1,12	–	1,25	1,30	–	–	–	–	–	–	–
0,77	0,64	0,69	–	0,80	0,86	–	–	1,04	–	1,16	–	–	1,35	–	1,50	1,56	–	–	–
0,80	0,59	0,671	0,72	0,77	0,83	0,90	0,96	–	1,08	–	1,20	–	–	1,49	–	–	1,62	–	–
0,83	0,55	0,62	0,69	0,74	0,80	0,86	0,93	1,00	–	1,12	–	1,25	–	–	–	–	–	1,68	–
0,86	0,51	0,59	0,64	0,72	0,77	0,83	0,90	0,96	1,04	–	1,16	–	1,30	–	1,45	1,50	–	–	1,74
0,90	0,44	0,51	0,59	0,67	0,74	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	–	1,20	–	1,35	–	–	1,56	–	–
0,93	–	0,47	0,55	0,62	0,69	–	0,83	0,90	0,96	1,04	1,12	–	1,25	–	1,40	–	–	–	–
0,96	–	–	0,49	0,57	0,64	0,72	0,80	0,86	0,93	1,00	1,08	1,16	–	1,30	–	1,45	–	1,62	–
1,00	–	–	–	0,51	0,59	0,67	0,74	0,83	0,90	0,96	1,04	1,12	1,20	–	1,35	–	1,50	–	1,68
1,04	–	–	–	–	0,51	0,59	0,69	0,77	0,86	0,93	1,00	1,08	1,16	1,25	1,30	1,40		1,56	–
1,08	–	–	–	–	0,44	0,51	0,62	0,72	0,80	0,90	0,96	1,04	1,12	1,20	–	1,35	1,45		1,62
1,12	–	–	–	–	–	0,44	0,55	0,64	0,74	0,83	0,93	1,00	1,08	1,16	1,25	–	1,40	1,50	
1,16	–	–	–	–	–	–	0,47	0,57	0,69	0,77	0,86	0,96	1,04	1,12	1,20	1,30	–	–	1,56
1,20	–	–	–	–	–	–	–	0,49	0,62	0,72	0,80	0,90	1,00	1,08	1,16	1,25	1,35	1,45	
1,25	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51	0,62	0,74	0,83	0,93	1,04	1,12	1,20	1,30	1,40	1,50
1,30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51	0,64	0,74	0,86	0,96	1,04	1,16	1,25	1,35	1,45
1,35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,53	0,64	0,77	0,90	1,00	1,08	1,20	1,30	1,40
1,40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,53	0,69	0,80	0,93	1,04	1,12	1,25	1,35
1,45	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,57	0,72	0,86	0,96	1,08	1,20	1,30
1,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,62	077	0,86	1,00	1,12	1,25
1,56	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,62	0,77	0,90	1,04	1,16
1,62	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,64	0,80	0,96	1,08
1,68	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,44	0,67	0,83	1,00
1,74	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,49	0,72	0,86
1,81	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51	0,72
1,88	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,51

	2,02	2,10	2,26	2,44	2,63	2,83	3,05	3,28	3,53	3,80	4,10	4,50	4,80	5,20
0,51	1,95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,53	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,55	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,57	–	2,02	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,59	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,62	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,64	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,67	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,69	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,72	1,88	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,74	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,77	–	1,95	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,83	–	–	2,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,86	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,90	1,81	–	–	2,26	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,93	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,96	–	–	–	–	2,44	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,00	1,74		2,02	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,04	–	–	–	–	–	2,63	–	–	–	–	–	–	–	–
1,08	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,12	1,68	–	1,95	–	–	–	2,83	–	–	–	–	–	–	–
1,16		1,74	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,20	1,62	–	–	–	–	–	–	3,05	–	–	–	–	–	–
1,25	1,56	1,68	1,88	2,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,30	–	–	–	–	–	–	–	–	3,28	–	–	–	–	–
1,35	1,50	1,62	1,81	2,02	2,26	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,40	1,45	1,56	–	–	–	–	–	–	–	3,53	–	–	–	–
1,45	1,40	1,50	1,74	1,95	–	2,44	–	–	–	–	–	–	–	–
1,50	1,35	1,45	1,68	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,56	1,25	1,40	1,62	1,88	2,10	–	2,63	–	–	–	3,80	–	–	–
1,62	1,20	1,35	1,56	1,81	–	–	–	2,83	–	–	–	–	–	–
1,68	1,12	1,25	1,50	1,74	2,02	2,26	–	–	–	–	–	–	4,50	–
1,74	1,00	1,16	1,45	1,68	1,95	–	–	–	3,05	–	–	–	–	–
1,81	0,90	1,08	1,35	1,62	1,88	–	2,44	–	–	–	–	–	–	–
1,88	0,72	0,93	1,25	1,56	1,81	2,10	–	–	–	3,28	–	4,10	–	–
1,95	0,51	0,77	1,12	1,45	1,74	2,02	–	2,63	–	–	–	–	–	4,80
2,02	–	0,57	1,00	1,35	1,68	1,95	2,26	–	–	–	–	–	–	–
2,10	–	–	0,83	1,25	1,56	1,88	–	–	2,83	–	3,53	–	–	–
2,26	–	–	–	0,90	1,35	1,68	2,02	–	–	3,05	–	–	–	–
2,44	–	–	–	–	0,96	1,45	1,81	–	–	–	3,28	3,80	4,10	–
2,63	–	–	–	–	–	1,04	1,56	1,95	–	–	–	–	–	4,50
2,83	–	–	–	–	–	–	1,12	1,62	2,10	–	–	–	–	–
3,05	–	–	–	–	–	–	–	1,20	1,74	2,26	–	3,28	–	–
3,28	–	–	–	–	–	–	–	–	1,30	1,88	2,44	3,05	3,53	–
3,53	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,40	2,10	–	3,28	3,80
3,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,56	2,44	–	3,53
4,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,88	2,44	–
4,50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,68	2,63
4,80	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1,95